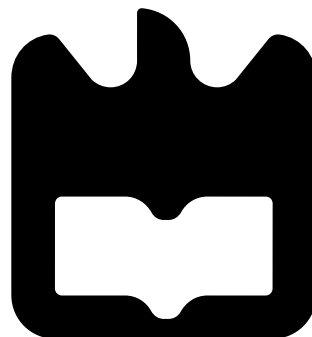




**Cláudio Daniel
Valente Franco**

**Desenvolvimento de uma bancada de testes para
motores elétricos**





**Cláudio Daniel
Valente Franco**

**Desenvolvimento de uma bancada de testes para
motores eléctricos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Rui Escadas , Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professor Doutor Paulo Alexandre Ferreira Neto Alves Afonso

Professor Coordenador S/ Agregação, Universidade de Aveiro

Professor Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Agradecimentos / Acknowledgments

Esta dissertação veio concluir uma fase importante do meu percurso académico.

Tal não seria possível sem o apoio incondicional dos meus pais e irmã que estiveram sempre presentes nos momentos mais importantes deste meu percurso académico. Obrigado por tudo.

Quero agradecer também ao Prof. Dr. Rui Escadas pelo apoio e conselho. Aos Mestres Rómulo Antão e Tiago pela ajuda, partilha de conhecimento, companheirismo. Quero também dar uma palavra de apreço a todas as pessoas que se cruzaram comigo no Departamento de Electrónica e Telecomunicações, pela alegria e disponibilidade que trouxeram para este local de trabalho.

A todos os meus amigos, que sempre confiaram nas minhas capacidades para superar este desafio, pelos momentos de descompressão e motivação.

Resumo

Nos dias de hoje os motores elétricos são uma parte importante da indústria sendo utilizados numa grande variedade de equipamentos. A sua importância juntamente com o seu continuo desenvolvimento constituiu o principal motivo para a realização deste projeto.

Nesta dissertação pretende-se desenvolver uma bancada de testes para motores elétricos independentemente da sua alimentação. Esta bancada será capaz de fornecer uma interface gráfica, em tempo real, da eficiência e resposta de um motor elétrico quando sujeito a uma carga variável ou constante no tempo.

Por fim irá ser efetuada uma análise a um motor elétrico de corrente continua sem escovas retirando através dos gráficos obtidos as devidas conclusões.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Contexto e enquadramento do trabalho	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
2 Motores elétricos	5
2.1 Introdução	5
2.2 História dos motores elétricos	5
2.3 Tipos de motores elétricos	6
2.3.1 Motores elétricos DC	7
2.3.2 Motores AC/Motores de indução	9
2.3.3 Conclusão	11
3 Implementação	13
3.1 Introdução	13
3.2 Arquitetura	13
3.3 Design de hardware	17
3.3.1 Microcontrolador	17
3.3.2 Sensores	18
3.3.3 Motor de carga	26
3.4 Design de software	33
3.4.1 Firmware	33
3.4.2 Aplicação	35
4 Resultados	47
4.1 Introdução	47
4.2 Testes de calibração	48
4.2.1 Testes de corrente	48
4.2.2 Testes de tensão	51

4.3	Resultados finais	55
5	Conclusões	59
5.1	Trabalho futuro	60
	Bibliografia	62

Lista de Figuras

1.1	Motores elétricos. [1]	1
1.2	Bancada de testes. [2]	2
2.1	Barlow's Wheel [3]	5
2.2	Tipos de motores elétricos	6
2.3	Motor DC com escovas [4]	7
2.4	Motor DC sem escovas [5]	7
2.5	Representação de um motor DC sem escovas com 1 fase [6]	7
2.6	Representação de um motor DC sem escovas com 3 fases [6]	8
2.7	Representação de um motor elétrico DC com escovas. [7]	8
2.8	Estator de um motor de indução [8]	9
2.9	Rotor bobinado [9]	10
2.10	Rotor gaiola de esquilo [10]	10
2.11	Estator de um motor de indução [11]	10
2.12	Estator de um motor de indução [12]	11
3.1	Arquitetura do projeto	14
3.2	Arquitetura do projeto	15
3.3	Curvas de um motor. [13]	16
3.4	Placa PICDETI32	17
3.5	Sensor de torque. [14]	18
3.6	Sensor de corrente CSLA2CD. [15]	19
3.7	Circuito de acondicionamento de sinal do sensor de corrente	20
3.8	Circuito de acondicionamento de sinal do sensor de tensão.	22
3.9	Tensão de saída em função da tensão de entrada. [?]	23
3.10	Configurações trifásicas. [16]	24
3.11	Circuito dos relés	24
3.12	Circuito de controlo dos relés	25
3.13	Motor de carga com motor em testes acoplado	26
3.14	Inversor utilizado no controlo do motor de carga	27
3.15	Trama do protocolo USS. [17]	27
3.16	Tempos de transmissão de tramas. [17]	28
3.17	Representação dos diferentes PPO. [17]	29
3.18	Constituição do Control word (STW). [17]	30
3.19	Constituição do Status word (ZSW). [17]	31
3.20	Estrutura da trama	33

3.21	Estrutura da trama no envio dos valores lidos pela Conversor Analógico-Digital (ADC).	34
3.22	Exemplificação da comunicação entre o microcontrolador (Slave) e o programa (Master)	35
3.23	Funcionamento inicial do programa desenvolvido.	35
3.24	Funcionamento da aplicação desenvolvida	36
3.25	Módulo de controlo do motor de carga	37
3.26	Funcionamento da aplicação desenvolvida	38
3.27	Diagrama de blocos do processamento de dados do microcontrolador para a corrente	39
3.28	Janela principal da aplicação desenvolvida	42
3.29	Opções do motor de carga	43
3.30	Parâmetros	43
3.31	Opções	44
3.32	Calibração da bancada de testes	45
4.1	Bancada de testes desenvolvida	47
4.2	Fonte alimentação	48
4.3	Resistência de elevada potência com dissipador de calor	48
4.4	Gráfico da corrente obtida em função da medida para o sensor RB0	49
4.5	Gráfico da corrente obtida em função da medida para o sensor RB1	49
4.6	Gráfico da corrente obtida em função da medida para o sensor RB2	50
4.7	Gráfico da tensão obtida em função da medida para o sensor RB3	51
4.8	Gráfico da tensão obtida em função da medida para o sensor RB4	52
4.9	Gráfico da tensão obtida em função da medida para o sensor RB5	52
4.10	Motor em teste	55
4.11	Bateria do motor em teste	55
4.12	Curva de torque imposta ao motor em teste	56
4.13	Gráfico de performance do motor em teste quando sujeito a uma carga	57
4.14	Gráfico da potência de entrada no Motor em teste quando sujeito a carga	57
4.15	Gráfico da corrente de entrada no motor em teste quando sujeito a carga	58

Lista de Tabelas

3.1	Caraterísticas da bancada de testes	16
3.2	Caraterísticas do sensor de corrente	19
3.3	Tensão máxima e erro do sinal do sensor de corrente após divisor resistivo. . .	21
3.4	Características do motor de carga.	26
3.5	Tamanho das tramas do inversor.	28
3.6	Parâmetros de configuração do inversor.	32
3.7	Comandos do microcontrolador.	34
4.1	Teste do sensor de corrente RB0	48
4.2	Teste do sensor de corrente RB1	48
4.3	Teste do sensor de corrente RB2	49
4.4	Valores de calibração para os sensores de corrente	50
4.5	Teste do sensor de tensão RB3	51
4.6	Teste do sensor de tensão RB4	51
4.7	Teste do sensor de tensão RB5	51
4.8	Valores de calibração para os sensores de tensão	53
4.9	Erros do sensor de tensão RB3	53
4.10	Erros do sensor de tensão RB4	53
4.11	Erros do sensor de tensão RB5	53
4.12	Erros dos sensor de tensão	53
4.13	Erros do sensor de corrente RB0	54
4.14	Erros do sensor de corrente RB1	54
4.15	Erros do sensor de corrente RB2	54
4.16	Erros dos sensor de corrente	54

Lista de Acrónimos

DC Corrente Continua

AC Corrente Alternada

ADC Conversor Analógico-Digital

RPM Rotações por minuto

PIC Peripheral Interface Controller

V Volts

A Amperes

STX start byte

BCC block check character

LGE tamanho

ADR endereço

PPO Parameter Process data Objects

PKW Paramater Label Value

PZD Process Data

PKE Parameter Label

IND Index

PWE Parameter Value

STW Control word

ZSW Status word

SW Setpoint

fem força eletromotriz

ACK Acknowledge

W Watt

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e enquadramento do trabalho



Figura 1.1: Motores elétricos. [1]

Nos dias de hoje os motores elétricos são uma parte importante da indústria sendo utilizados numa grande variedade de equipamentos. A sua crescente utilização tem vindo a estimular o seu contínuo desenvolvimento tendo em vista a obtenção de motores elétricos com melhores performances. Como consequência podem-se encontrar, atualmente, no mercado uma grande diversidade de motores com características e performances distintas.

O processo de investigação e desenvolvimento de novos produtos possui um ciclo de vida que se inicia na exploração do conceito e estudo de fiabilidade e termina no desenvolvimento e validação do produto final. Durante este processo pode-se encontrar diversas fases de testes

cujo objetivo é validar uma fase ou conceito de forma a permitir, dependendo do seu resultado, iniciar a fase seguinte ou proceder às alterações necessárias.

Esta dissertação enquadra-se numa fase de testes final onde se pretende analisar o motor desenvolvido.

É neste contexto que se encontra este projeto pois, tal como referido, qualquer produto desenvolvido necessita de passar por fases de testes sendo parte destes efetuados recorrendo a uma bancada de testes.

1.2 Objetivos

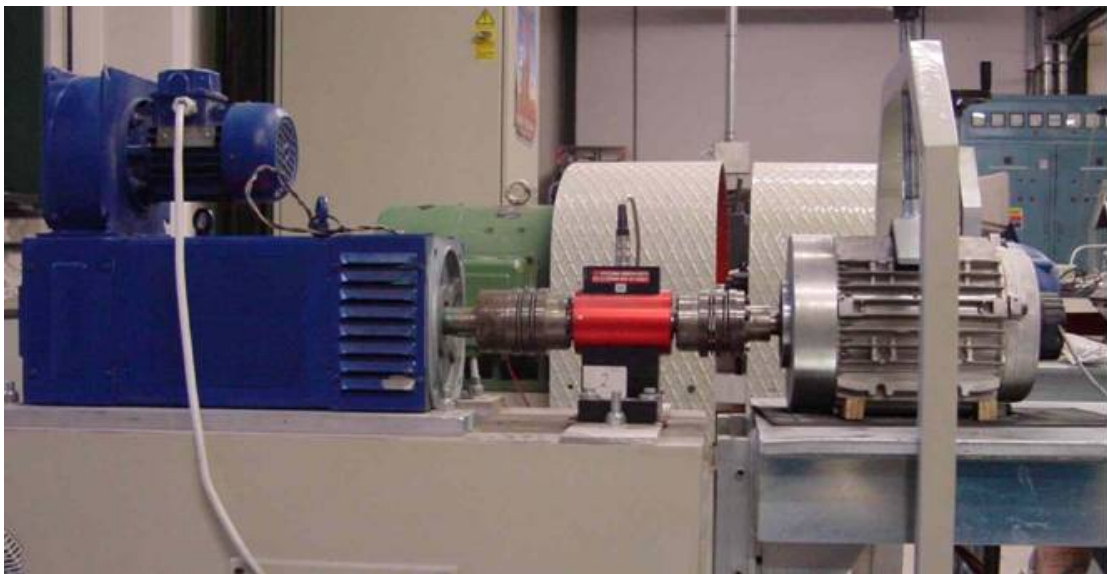


Figura 1.2: Bancada de testes. [2]

Esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver uma bancada de testes de motores elétricos capaz de testar a performance dos mesmos. A figura 1.2 ilustra um exemplo de uma bancada de testes desenvolvida pelo "Research Group on Power Electronics, Electrical Machines and Drives" na universidade de Bolonha. Uma vez que o controlador representa parte importante do motor elétrico pretende-se também permitir a análise do mesmo.

Tendo por base os objetivos gerais acima identificados pode-se subdividir esta dissertação em 4 objetivos, sendo estes:

- Recolha de informação;
- Desenvolvimento de hardware;
- Desenvolvimento de software;
- Resultados.

1.3 Metodologia

A presente dissertação tem como objetivo desenvolver uma bancada de testes para motores elétricos. Par tal começou-se por efetuar um pequeno estudo sobre estes motores procurando entender, de forma geral, o seu funcionamento, as suas principais características e a diversidade de opções existentes no mercado. De seguida elaborou-se um segundo estudo com o objetivo de identificar os testes mais importantes efetuados num motor elétrico. Neste ponto foram detetados diversos testes, no entanto, tendo em conta que a bancada de testes a ser desenvolvida nesta dissertação pretende testar a performance dos motores elétricos e seus controladores restringiu-se o presente estudo á performance.

Após esta fase transitou-se para o desenvolvimento do hardware tendo sido escolhidos os sensores, o microcontrolador e o motor utilizado como carga, ou seja, utilizado para impor torque sobre o motor em teste. Uma vez escolhidos todos os sensores concebeu-se todo o circuito de acondicionamento. Também nesta fase, criou-se um protocolo utilizado na comunicação entre o microcontrolador escolhido e o software desenvolvido. Paralelamente a este protocolo desenvolveu-se o firmware responsável por recolher os dados dos sensores, processá-los e transmiti-los.

De seguida criou-se o software capaz de comunicar com o microcontrolador recolhendo os dados por ele transmitidos, processando-os e permitindo a sua visualização e análise em forma de gráficos. Tendo em conta que este software tem também como objetivo controlar o motor de carga foi necessário proceder ao estudo do Protocolo de comunicação utilizado.

Após o desenvolvimento de todo o hardware, firmware e software realizou-se testes capazes de validar os valores obtidos, tendo sido estes também utilizados para efetuar a calibração da bancada de testes. Finalmente efetuou-se um teste de performance a um motor elétrico e seu controlador.

Capítulo 2

Motores elétricos

2.1 Introdução

Este capítulo inicia-se por uma introdução aos motores elétricos sendo evidenciados os principais avanços históricos que levaram ao descobrimento e à evolução dos motores que hoje utilizamos. Uma vez efetuado o enquadramento histórico passaremos à descrição de alguns dos diferentes tipos de motores que poderão ser testados na bancada de testes desenvolvida nesta dissertação.

2.2 História dos motores elétricos

A história dos motores elétricos incia-se com o desenvolvimento do primeiro dispositivo capaz de criar uma rotação originada por campos electromagnéticos. Tal dispositivo, visível na figura 2.1, teve como autor o Inglês Peter Barlow em 1822 sendo nos dias de hoje conhecido por Barlow's Wheel.

No entanto torna-se importante referir que tal apenas foi possível devido à invenção da bateria por Alessandro Volta em 1800, à geração de um campo magnético originado por corrente elétrica em 1820 por Hans Oersted e à descoberta do eletroímã por William Sturgeon em 1825. Estas três conquistas representam as fundações para a invenção dos motores

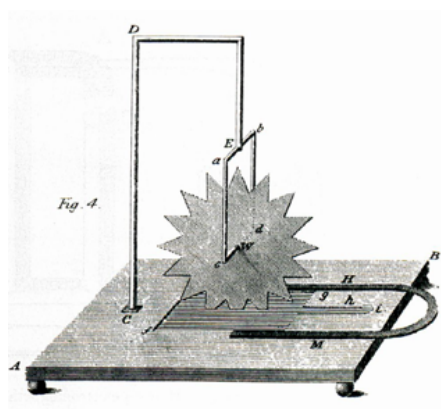


Figura 2.1: Barlow's Wheel [3]

elétricos.

Apenas cerca de 22 anos mais tarde, em maio de 1834, foi desenvolvido o primeiro motor eléctrico por Moritz Jacobi. Neste ano o motor em questão inaugurou o recorde do mundo como motor com maior potencia.

Um ano mais tarde, em 1835, os holandeses Sibrandus Stratingh e Christopher Becker desenvolvem o primeiro motor eléctrico utilizado num automóvel. Esta foi a primeira aplicação prática de um motor eléctrico. Em 1838 Moritz Jacobi melhora o seu recorde com um motor capaz de transportar 14 pessoas num barco de uma margem à outra do rio.

Contudo, os avanços até agora referidos, apesar de importantes, não representam as fundações para os motores eléctricos utilizados nos dias de hoje. Foi a invenção do comutador por William Ritchie e Hippolyte Pixii em 1832 e a criação do primeiro gerador de tensão eléctrico baseado no princípio de indução eletromagnética por Werner Siemens em 1866 constituíram as fundações para o desenvolvimento dos motores Corrente Continua (DC) da atualidade.

Os motores Corrente Alternada (AC) tiveram o seu desenvolvimento entre 1885 e 1889 tendo sido o primeiro motor trifásico síncrono desenvolvido por Friedrich August Haselwander em 1887 e o primeiro motor trifásico com rotor de gaiola desenvolvido pelo engenheiro eletrotécnico Michael Dolivo-Dobrowolsky em 1889.

2.3 Tipos de motores eléctricos

Os motores eléctricos consistem em maquinas capazes de transformar energia eléctrica em mecânica. A sua funcionalidade e existência em grande variedade torna-os elementos fundamentais na indústria atual. Sendo assim procedeu-se à sua divisão de acordo com o seu tipo de alimentação e princípio de funcionamento.

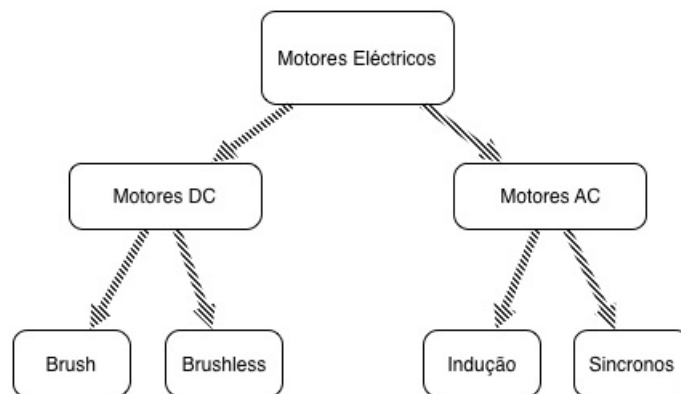


Figura 2.2: Tipos de motores eléctricos

A figura 2.2 ilustra os diferentes tipos de motores tendo em conta as características já referidas. A divisão dos tipos de motores eléctricos pode ainda ser complementada analisando outros parâmetros, no entanto não é objetivo desta dissertação elaborar estudo intensivo dos mesmos, mas sim fornecer ao leitor os seus princípios básicos de funcionamento. Como tal serão apenas estudados os tipos de motores identificados na figura.

2.3.1 Motores elétricos DC

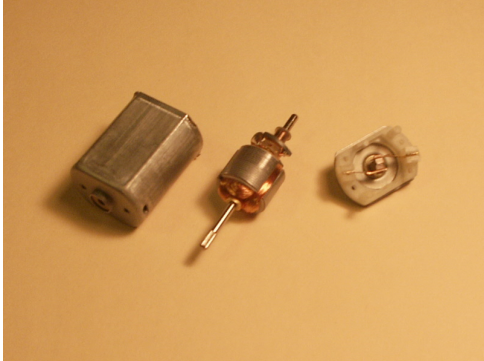


Figura 2.3: Motor DC com escovas [4]

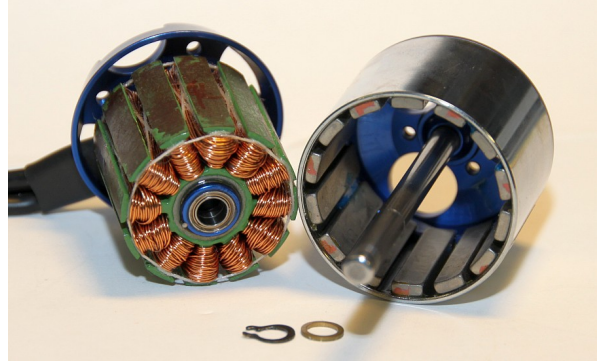


Figura 2.4: Motor DC sem escovas [5]

Tendo em conta o seu princípio de funcionamento os motores elétricos DC subdividem-se em dois grandes grupos, os com escovas e os sem escovas. As figuras 2.3 e 2.4 ilustram um exemplo de cada um destes tipos de motores.

Nos motores elétricos DC sem escovas o rotor é normalmente constituído por um rotor bobinado ou imans permanentes e o estator por um número par de enrolamentos sendo que cada par representa uma fase. De modo a melhor entender o princípio de funcionamento deste tipo de motores comecemos por analisar a figura 2.5 que representa um motor sem escovas, cujo estator possui apenas uma fase, em 3 momentos diferentes do seu funcionamento.

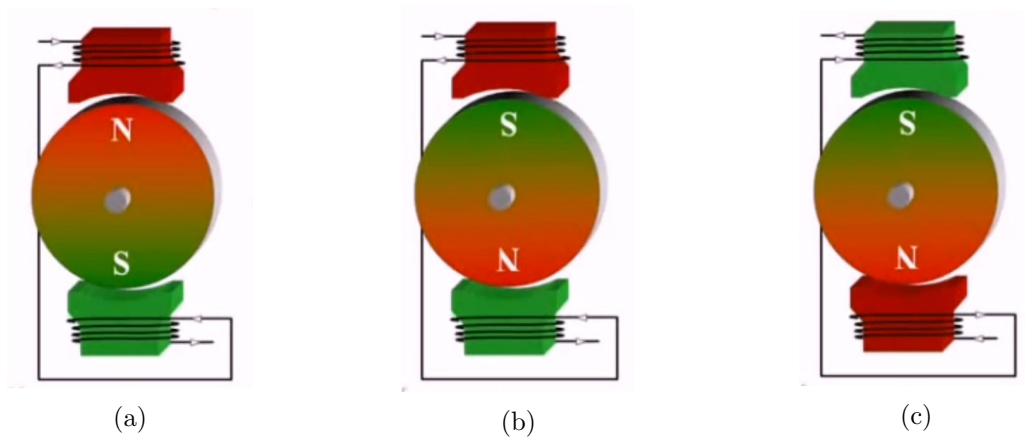


Figura 2.5: Representação de um motor DC sem escovas com 1 fase [6]

Num primeiro momento o enrolamento do estator é sujeito a uma corrente originando um campo magnético cuja polaridade é visível na figura a. A interação entre este campo e o rotor tem como resultado um torque responsável pela rotação do rotor para o estado seguinte, figura b. Neste instante torna-se necessário inverter a polaridade do campo magnético no estator de modo a induzir um novo torque. Desta inversão resulta uma nova rotação do rotor sendo então necessário repetir o mesmo processo. No entanto analisando melhor a figura 2.5: a, verifica-se que não é possível garantir o sentido de rotação do rotor. Torna-se necessário utilizar um estator com um maior número de fases. A figura 2.6 representa um motor DC

cujo estator possui 3 fases.

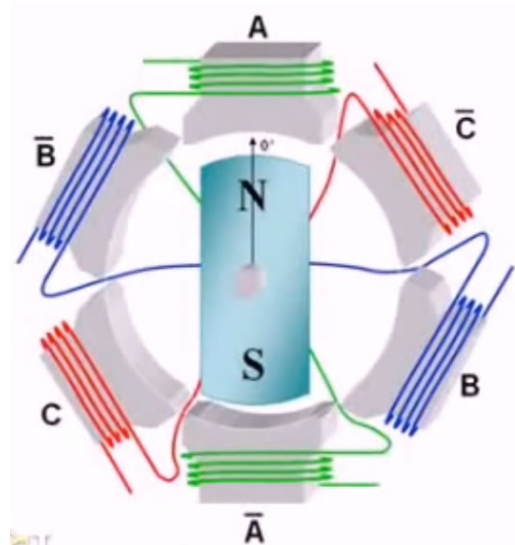


Figura 2.6: Representação de um motor DC sem escovas com 3 fases [6]

Seguindo o mesmo princípio facilmente se entende que induzindo a polaridade correta na fase adjacente à posição do rotor pode-se garantir o sentido de rotação do mesmo. No entanto verifica-se também a necessidade de conhecer a posição do rotor de modo a ativar as fases e polaridades corretas. Para tal são normalmente utilizados sensores de hall.

Nos motores DC com escovas a constituição o estator e rotor é invertida, isto é, o estator é normalmente constituído por imanes permanentes ou eletroímans fixos. Por sua vez o rotor é constituído por enrolamentos que quando sujeitos a uma corrente produzem um campo magnético com uma determinada polaridade. A variação deste campo é responsável pela rotação do rotor e tem origem no sentido das correntes nos enrolamentos do mesmo. Esta variação designa-se por comutação e é efetuada mecanicamente por intermédio das escovas. A figura 2.7 tem como finalidade representar um motor DC com escovas.

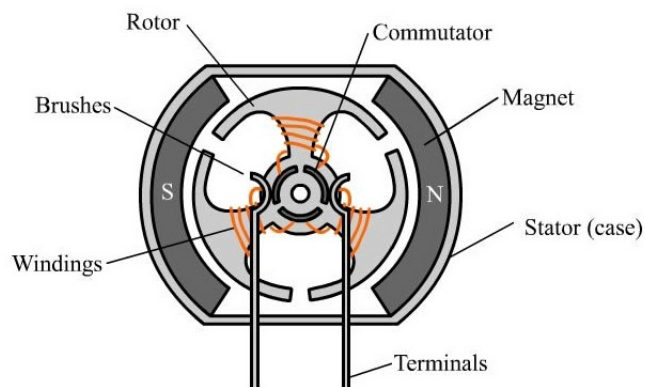


Figura 2.7: Representação de um motor elétrico DC com escovas. [7]

Analisando a figura verifica-se que as correntes são fornecidas aos enrolamentos (windings) através do contacto entre as escovas e o comutador. Uma vez que a passagem de corrente nos enrolamentos induz um campo magnético pode-se, seguindo o mesmo princípio descrito nos motores sem escovas, concluir que o rotor irá efetuar um movimento rotacional derivado ao torque criado por interação entre o seu campo e o estator. Consequentemente os contactos entre as escovas e o comutador irão se alterar variando assim as correntes nos enrolamentos do rotor e por conseguinte o seu campo magnético. Esta constante variação do campo magnético do rotor constitui o princípio de funcionamento dos motores elétricos DC com escovas. No entanto devido ao constante contacto entre o comutador e as escovas estes componentes sofrem desgaste, elevando assim os custos de manutenção deste tipo de motores. Este constitui a grande desvantagem entre os motores com e sem escovas.

2.3.2 Motores AC/Motores de indução

Num motor elétrico de indução a criação de binário é efetuada da mesma forma que num motor DC, isto é, pela interação axial das correntes elétricas do rotor com o campo magnético radial do estator. A grande diferença e vantagem entre os dois tipos de motores encontra-se no método cuja corrente é fornecida ao rotor. No caso de um motor DC a corrente é, tal como já foi referido anteriormente, fornecida ao rotor através da utilização de escovas e comutadores. No caso dos motores de indução a corrente no rotor é induzida através da ação de um campo eletromagnético. Por conseguinte os motores que possuem este princípio de funcionamento são denominados motores de indução. Esta ausência de escovas representa uma das suas grandes vantagens pois reduz os seus custos de produção e manutenção.

O estator, visível na figura 2.8 representa o elemento fixo e é constituído pelo empilhamento de lâminas de ferro tratado termicamente. Estas são dotadas de ranhuras onde posteriormente são colocados os enrolamentos que constituem as bobinas que quando sujeitas a correntes alternadas geram um campo magnético variável.



Figura 2.8: Estator de um motor de indução [8]

O rotor constitui o elemento móvel do motor de indução podendo ser de dois tipos:

- o rotor gaiola de esquilo, composto por um cilindro de ferro com condutores de cobre ou alumínio embutidos na sua superfície;
- o rotor bobinado, composto por enrolamentos distribuídos em torno de chapas. Estes encontram-se ligados através de "slip rings" a resistências externas que sendo alteradas permitem variar a velocidade do motor.

As figuras 2.10 e 2.9 ilustram, respetivamente, rotor gaiola de esquilo e bobinado.

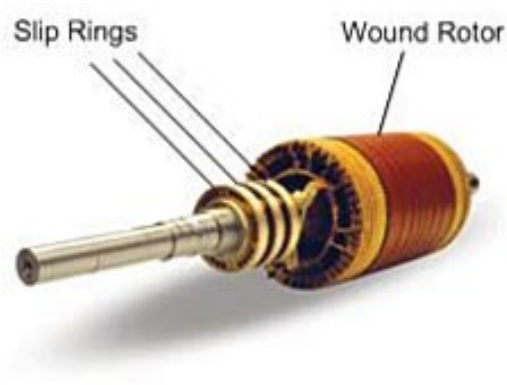


Figura 2.9: Rotor bobinado [9]

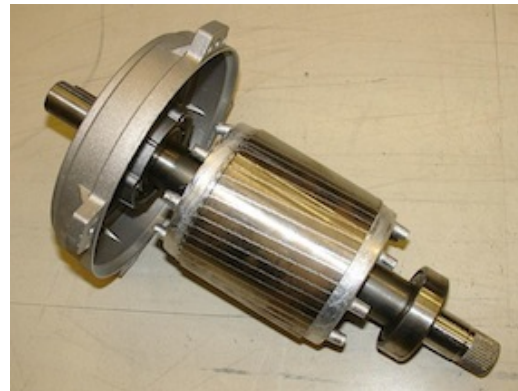


Figura 2.10: Rotor gaiola de esquilo [10]

De modo a melhor entender o princípio de funcionamento do motor elétrico de indução analisemos o caso simplificado da figura 2.11 contendo um enrolamento de três fases.

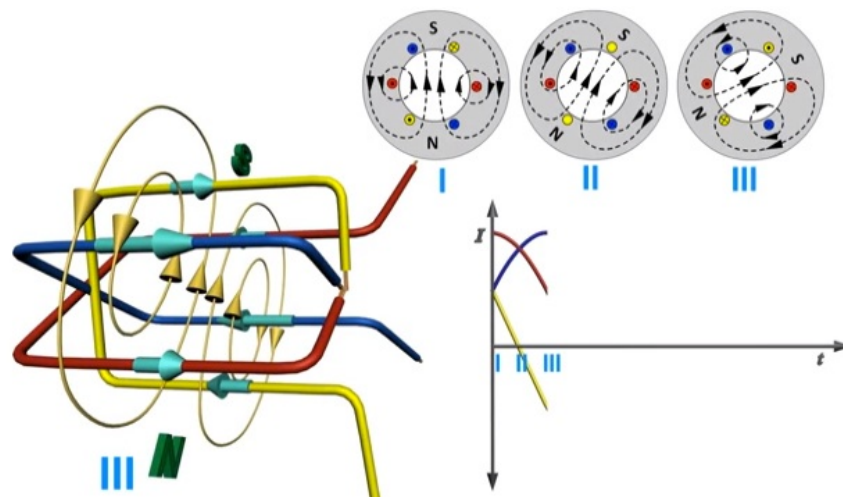


Figura 2.11: Estator de um motor de indução [11]

Observando os campos magnéticos em três instantes diferentes conclui-se que a variação das correntes nos enrolamentos tem como consequência a criação de um campo magnético rotacional. Introduzindo agora um condutor em circuito fechado no centro deste campo

verifica-se, segundo a lei de Faraday, a indução de uma força eletromotriz (fem) que por sua vez irá induzir uma corrente elétrica no condutor. Esta, segundo a lei de Lorenz, criará um força magnética capaz de impor um movimento rotacional ao condutor. Obtém-se então o princípio de funcionamento do motor elétrico de indução.

Motores síncronos

A constituição dos motores síncronos é semelhante aos motores de indução diferenciando-se apenas através da introdução de uma alimentação DC no rotor. Esta tem como objetivo induzir um campo magnético no rotor que terá como consequência a sua rotação em sincronismo com a variação do campo magnético no estator. Este fenómeno, representado na figura 2.12, consiste na principal diferença entre o motor síncrono e o de indução. Enquanto no primeiro a velocidade de rotação é igual à do campo, no segundo a velocidade é ligeiramente inferior.

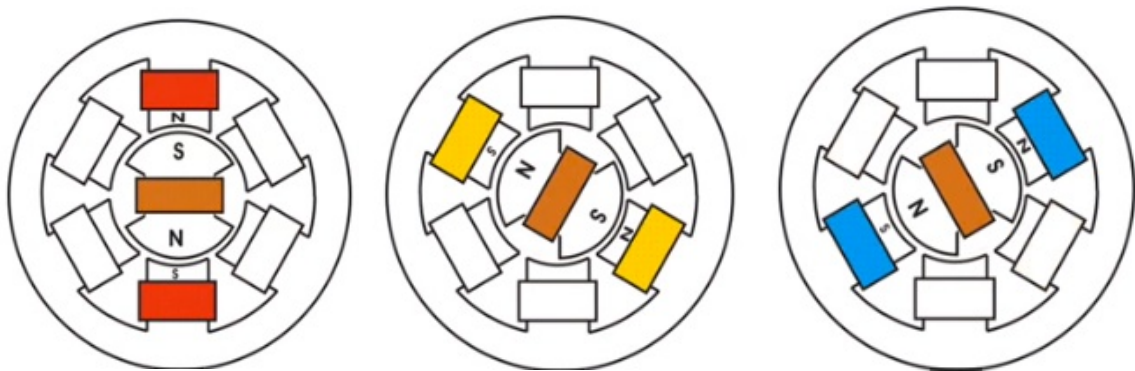


Figura 2.12: Estator de um motor de indução [12]

Uma vez que a velocidade de rotação do campo magnético no estator é elevada os polos do rotor não se conseguem sincronizar com os polos do estator sendo então necessário forçar a iniciação da sua rotação. Esta pode ser efetuada por influência externa, como por exemplo um segundo motor, ou pelo princípio de funcionamento de um motor elétrico de indução. Neste segundo caso a alimentação do rotor é desligada tornando o mesmo um motor de indução. O objetivo final desta iniciação consiste em diminuir a diferença de velocidade entre o rotor e o campo magnético do estator de modo a permitir o seu sincronismo.

2.3.3 Conclusão

O estudo dos motores elétricos pode ainda ser estendido para outros tipos de motores. Estes podem ainda ser subclassificados tendo em conta as suas características, no entanto como referido pretendeu-se apenas obter uma noção geral do princípio de funcionamento dos principais tipos de motores elétricos de modo a facilitar o desenvolvimento da bancada de testes.

Capítulo 3

Implementação

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever e justificar todas as escolhas efetuadas no desenvolvimento de todo o hardware necessário. Para tal, será primeiramente efetuada uma descrição detalhada da arquitetura do projeto tendo como objetivo identificar as necessidades para posteriormente proceder à escolha de todos os dos componentes e equipamentos utilizados. Uma vez identificadas as necessidades do projeto passaremos à descrição e justificação das escolhas efetuadas.

Na secção seguinte deste capítulo pretende-se descrever o firmware e software desenvolvido. Tal como no design de hardware nesta secção serão também descritas e justificadas todas as escolhas efetuadas.

3.2 Arquitetura

Para a concretização deste projeto procedeu-se ao estudo dos motores eléctricos tentando entender o seu funcionamento de forma a identificar as suas possíveis fontes de perdas. Tal estudo juntamente com os Standards existentes permitiram identificar os testes de performance capazes de fornecer os dados necessários para a análise de um motor eléctrico. A grande maioria destes testes permitem apenas obter conclusões de performance tendo em conta uma fonte específica de perdas. Foi devido a este facto que se optou pelo cálculo do rendimento tendo em conta a potência de entrada e saída.

Uma vez que o tipo de energia fornecida ao motor de teste (potência de entrada) difere da fornecida pelo mesmo a um sistema (potência de saída) conclui-se que o procedimento utilizado para o seu cálculo não poder ser idêntico. No caso da potência de entrada o tipo de energia é eléctrica levando à utilização de sensores de corrente e tensão de forma a obter os dados necessários para o seu cálculo. Para a potência de saída verifica-se que o tipo de energia é mecânico tendo como resultado uma força que se traduz na introdução de uma velocidade angular e um torque. Neste caso foram utilizados sensores capazes de medir estas duas grandezas possibilitando assim calcular a potência de saída. A diferença entre estas duas potências representa as perdas existentes no motor em teste e permite calcular o seu rendimento.

A figura 3.1 ilustra a arquitetura até este ponto descrita centrando-se em 2 blocos. O bloco dos sensores onde são obtidos os dados necessários ao cálculo das potências e o bloco

de Visualização onde estes dados podem ser visualizados e analisados pelo utilizador.

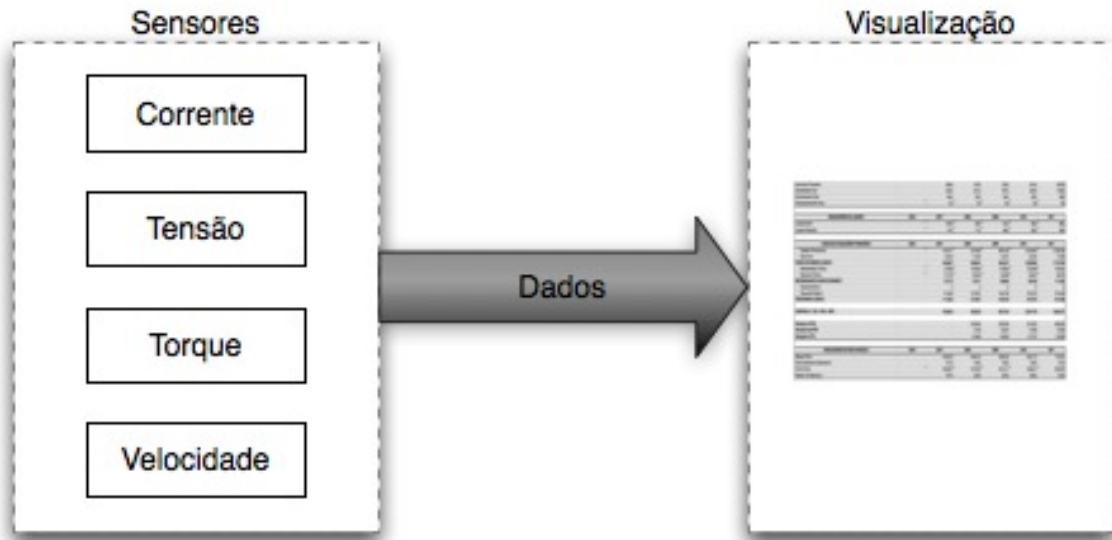


Figura 3.1: Arquitetura do projeto

Efetuada uma análise mais detalhada verifica-se a necessidade de um bloco intermédio capaz de ler e processar os dados fornecidos pelos sensores. Este bloco, visível na figura 3.2, pode então ser subdividido em três partes. Uma primeira parte consiste no acondicionamento dos sinais provenientes dos sensores de modo a permitir a sua leitura. O bloco seguinte consiste numa ADC cujo objetivo é converter os sinais analógicos em valores digitais para que sejam posteriormente processados.

Até este momento foi efetuada a descrição da arquitetura deste projeto tendo em conta a obtenção de dados para o cálculo do rendimento de um motor elétrico. Posto isto é necessário sujeitar o motor em teste a variações de carga de modo a permitir retirar conclusões plausíveis em relação à performance. Sendo assim torna-se necessário introduzir um novo motor, designado motor de carga, cuja sua função consiste em impor uma variação de torque.

Por fim é essencial um bloco responsável pelo controlo e sincronização dos diversos elementos da bancada de testes, isto é, o motor de carga, os sensores e a leitura dos sinais deles provenientes após o seu acondicionamento.

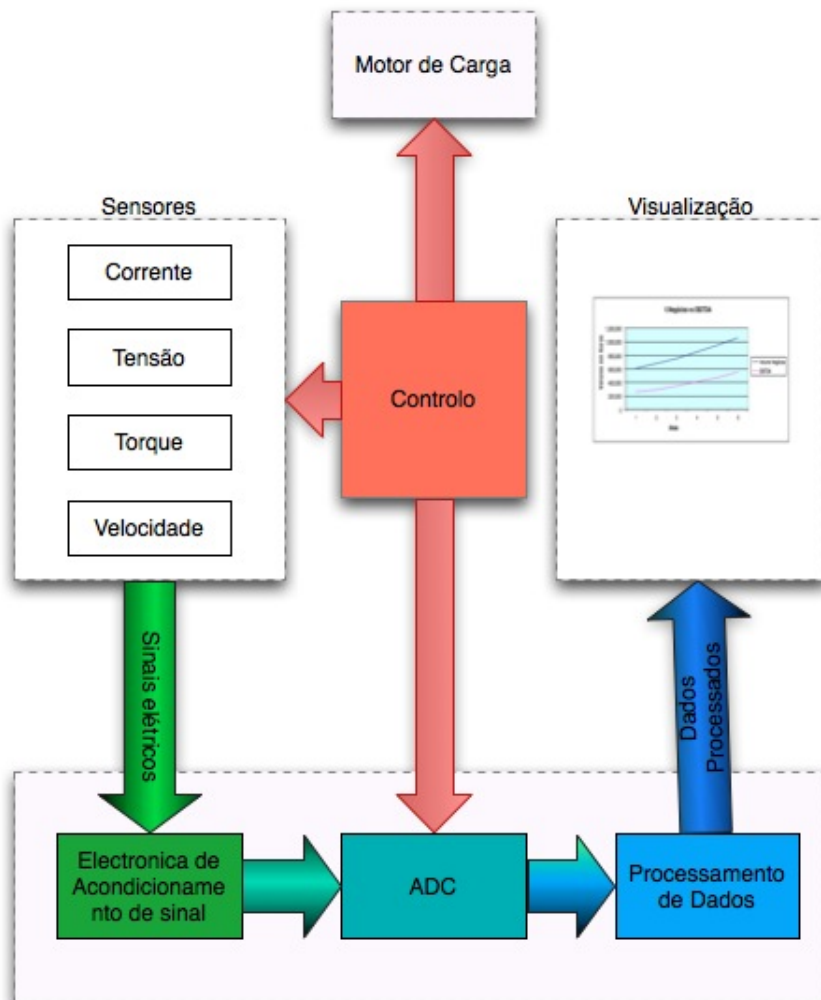


Figura 3.2: Arquitetura do projeto

Voltando ao bloco de visualização tem-se que este projeto tem como resultado final a obtenção da curva de rendimento do motor em teste. Como tal procurou-se entender quais as curvas mais comuns tendo-se optado pela curva de velocidade em função de torque, curva de rendimento e potência de entrada. A figura 3.3 consiste num exemplo destas curvas para um motor eléctrico.

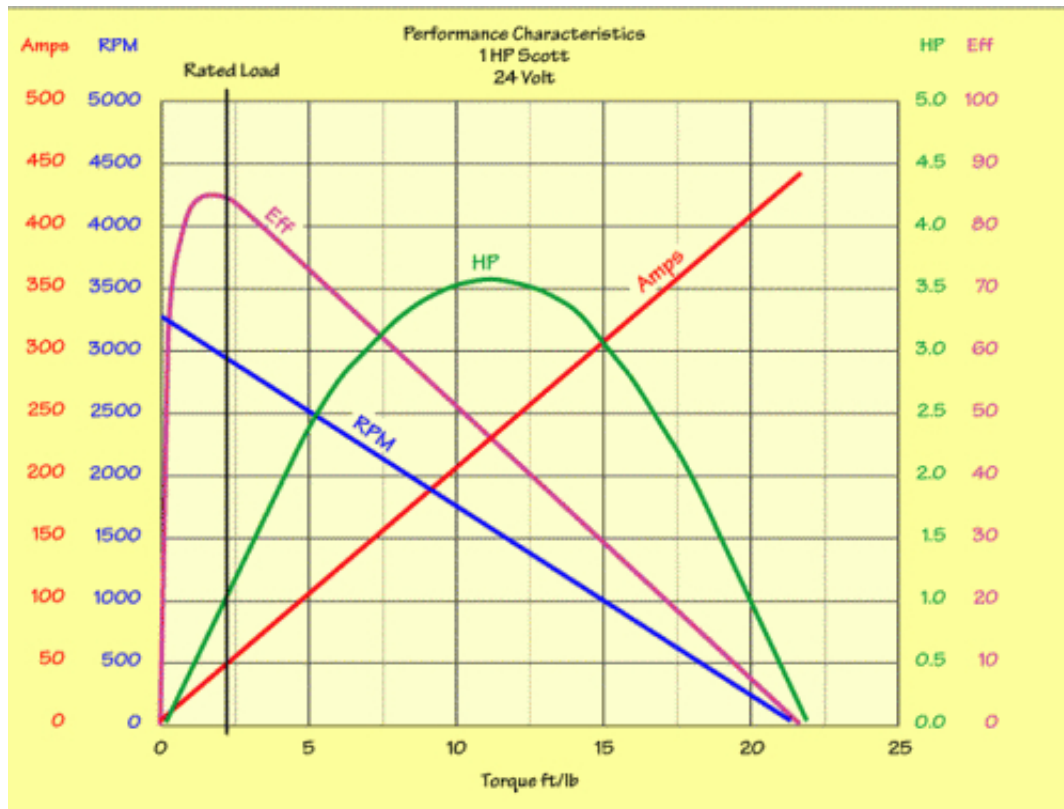


Figura 3.3: Curvas de um motor. [13]

Uma vez efetuada a descrição geral da arquitetura do projeto e necessário estipular algumas constantes por forma a facilitar a escolha dos sensores e componentes.

Tensão máxima	400 Volts (V)
Corrente máxima	40 Amperes (A)
Torque máximo	10Nm
Velocidade máxima	3000RPM
Potência máxima	16kW

Tabela 3.1: Caraterísticas da bancada de testes

3.3 Design de hardware

3.3.1 Microcontrolador

Na grande maioria dos sistemas eletrônicos da atualidade encontram-se unidades controladoras dedicadas à execução de tarefas como a instrumentação, o controlo e as comunicações de rede. Esta mesma unidade foi identificada na arquitetura da bancada de testes e teve como solução a introdução de um microcontrolador capaz de efetuar a leitura dos sensores, o controlo da bancada de testes e comunicação com a aplicação desenvolvida. Tendo por base estas funcionalidades e a existência, em armazém, da placa de desenvolvimento da figura 3.4 designada PICDETI32 optou-se pela utilização deste módulo como unidade de controlo.

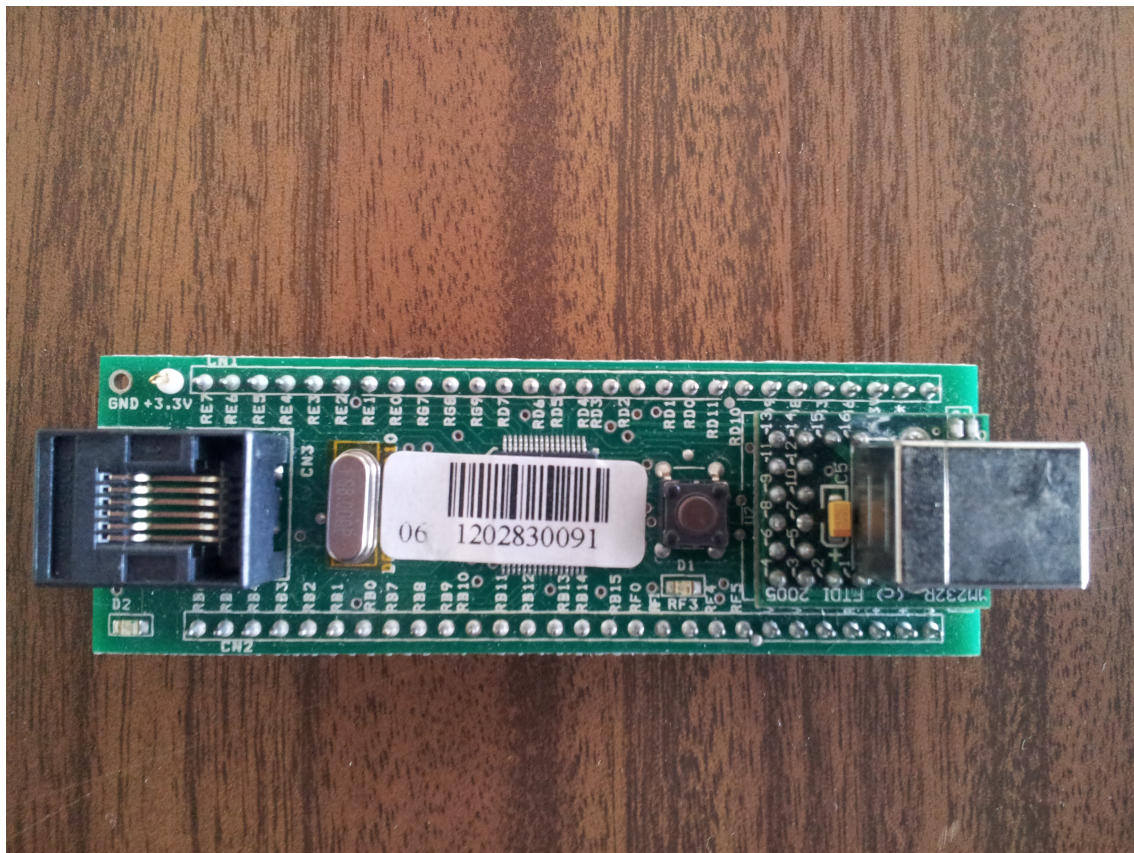


Figura 3.4: Placa PICDETI32

A placa PICDETI32 consiste num pequeno módulo que engloba todos os componentes que asseguram a operacionalidade do microcontrolador. Estes incluem:

- Controlador PIC32MX795F512H
- Cristal de 8MHs
- Regulador de 3,3V low dropout
- Conversor UART-USB

A sua utilização requer apenas uma alimentação de 5V e a sua programação é efetuada recorrendo ao Bootloader da Microchip previamente alterado. Uma vez que o microcontrolador escolhido já possui uma unidade conversora analógico/digital de 10 bits não foi necessária a introdução de um segundo elemento na unidade de controlo.

3.3.2 Sensores

Sensor de torque/velocidade

A existência de uma grande variedade de sensores de torque e velocidade no mercado juntamente com o seu elevado valor monetário tornou a sua escolha extremamente difícil. Foi então necessário estabelecer algumas características essenciais por forma a encontrar a solução que melhor se adaptar a este projeto.

A limitação da gama de funcionamento do sensor de torque a um valor máximo de 20 Nm e a preferência de proceder à aquisição de apenas um equipamento capaz de medir velocidade e torque possibilitou reduzir o número de opções e por conseguinte efetuar alguns pedidos de cotação. Estes foram posteriormente encaminhados para o orientador do projeto, responsável pela decisão final.

Numa fase inicial optou-se por adquirir o sensor da figura 3.5 cujo modelo e fabricante são TRS605 e Futek, respetivamente. No entanto durante a escolha do motor de carga verificou-se que este tinha como opção a inclusão destes dois sensores permitindo assim reduzir o custo final do projeto.

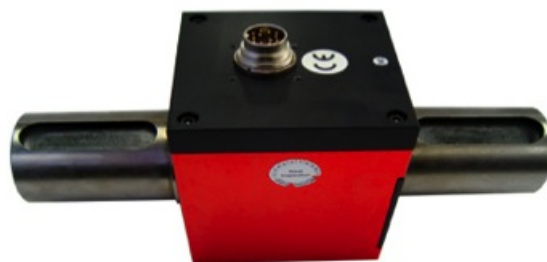


Figura 3.5: Sensor de torque. [14]

Sensor de corrente

Uma vez que as correntes que se pretendem analisar são elevadas optou-se pela utilização de um sensor de Hall devido ao facto deste não necessitar de qualquer contacto direto com o circuito em análise permitindo assim garantir a segurança de toda a eletrónica envolvida. Após uma análise das possíveis opções optou-se pelo sensor da figura 3.6 cujas suas principais características estão ilustradas na tabela 3.2.



Figura 3.6: Sensor de corrente CSLA2CD. [15]

Alimentação	6 a 12 V
Corrente máxima	72 A
Tensão de Offset	$V_{cc}/2 \pm 2\%V$
Sensibilidade	$32,7 \pm 3mV * NI$
Tempo de Resposta	$3\mu s$

Tabela 3.2: Caraterísticas do sensor de corrente

Analisando a tabela 3.2 identifica-se duas características importantes para o acondicionamento de sinal. A primeira consiste na introdução de uma tensão de offset cujo seu valor é metade da sua tensão de alimentação. Por conseguinte optou-se pela utilização da menor tensão de alimentação possível, 6V.

Tendo em conta que as correntes que se pretendem medir são alternadas, isto é, possuem componentes positiva e negativa, é necessário garantir que ambas as gamas de funcionamento destas componentes sejam idênticas. Tal facto levou ao desenvolvimento do circuito da figura 3.7 onde a tensão de offset introduzida pelo sensor de corrente é reduzida para metade do valor da gama de funcionamento da ADC, ou seja, 1,65 V.

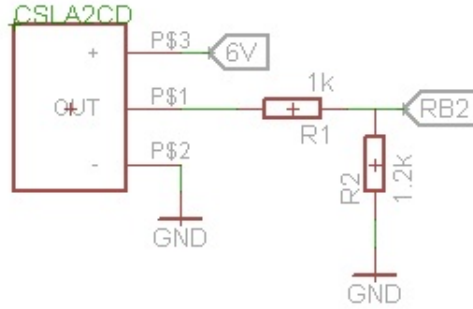


Figura 3.7: Circuito de acondicionamento de sinal do sensor de corrente

Neste caso tem-se que a a tensão de offset do sensor consiste em metade da sua tensão de alimentação, ou seja, $6\text{ V} / 2 = 3\text{V}$. Com isto temos que o ganho do divisor resistivo é dado por:

$$G = \frac{1,65\text{V}}{3\text{V}} = 0,55\text{V/V} \quad (3.1)$$

A segunda característica importante no acondicionamento do sinal consiste na proporcionalidade direta da sua sensibilidade e erro com o número de voltas do fio condutor no sensor de corrente. Esta característica permite concluir que quanto maior for o número de voltas menor será a precisão de medida. Passaremos agora à elaboração dos cálculos para uma volta ($Nl = 1$) e de seguida extrapolaremos os resultados para um maior número. Sendo assim temos que para uma sensibilidade de $32,7\text{ mV/A}$ e uma corrente máxima de 72 A , a tensão máxima do sinal do sensor é dada por:

$$V_{max,sensor} = Sensibilidade * Nl * I_{max} \approx 2,35\text{V} \quad (3.2)$$

Tendo agora em conta o divisor resistivo temos:

$$V_{max,entradaADC} = Sensibilidade * Nl * I_{max} * G \approx 1,29 \quad (3.3)$$

Efetuada agora o cálculo do erro do sensor para uma volta temos que:

$$\Delta V_{max,sensor} = \Delta Sensibilidate * Nl = 3\text{mV} \quad (3.4)$$

Após o divisor resistivo temos:

$$\Delta V_{max,entradaADC} = \Delta Sensibilidate * Nl * = 1,65\text{mV} \quad (3.5)$$

A tabela 3.3 ilustra tensão máxima e o erro do sensor após o divisor resistivo em função do número de voltas.

Número de voltas	$V_{\max}(\text{V})$	Erro do sensor(mV)
1	1,29	1,65
2	2,59	3,3
3	3,88	4,95
4	5,18	6,6

Tabela 3.3: Tensão máxima e erro do sinal do sensor de corrente após divisor resistivo.

Analisando a tabela 3.3 conclui-se que tendo em conta a gama de funcionamento da ADC e o sensor em questão apenas é possível efetuar a leitura de correntes pico a pico de 72 A aquando da utilização de uma volta no sensor.

Sensor de tensão

Uma vez que os motores que se pretendem estudar apresentam tensões e correntes elevadas teve-se como principal preocupação o isolamento deste sensor do restante circuito. Sendo assim optou-se por um sensor com isolamento interno existente no armazém da universidade cuja referência é *HCPL7520*. Este, normalmente utilizado como sensor de corrente, é um opto-coupler com uma relação linear entre a corrente de entrada e a tensão de saída o que possibilita a sua utilização para sinais analógicos. Neste caso recorreu-se à utilização de um divisor resistivo para efetuar a medição da tensão. A sua outra funcionalidade importante consiste na introdução de um ganho e offset proporcional à sua tensão de referência. A figura 3.8 representa todo o circuito do sensor de tensão que será detalhadamente analisado de seguida.

O sensor utilizado possui, tal como esperado devido ao seu isolamento interno, duas alimentações que limitam a sua gama de funcionamento. Como tal optou-se por utilizar as alimentações recomendadas pelo seu datasheet, sendo estas de 0 e 5 V. Torna-se então necessário proceder ao isolamento das tensões de alimentação do lado da entrada recorrendo a um conversor DC-DC que possui o isolamento pretendido.

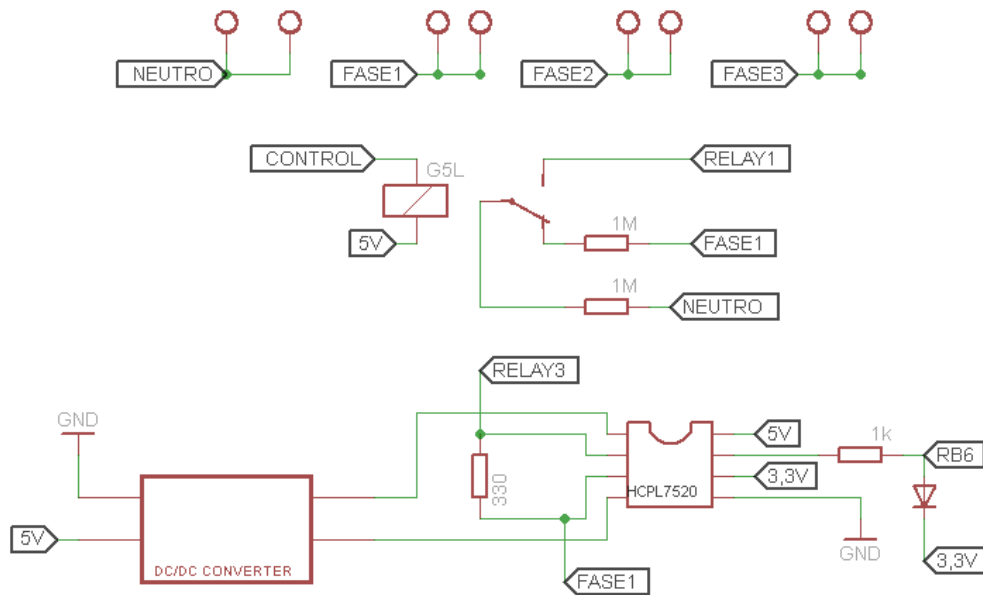


Figura 3.8: Circuito de acondicionamento de sinal do sensor de tensão.

Visto que qualquer uma das fases do motor trifásico possui componentes positivas e negativas é necessário impor um offset de modo a garantir que o sinal medido pelo sensor de tensão não possui qualquer componente negativa. Contudo observando atentamente o datasheet verifica-se que os sensores de tensão utilizados permitem tensões negativas, com as alimentações anteriormente referidas, sendo imposto um offset na saída dependente da tensão de referência. A figura 3.9 apresenta um gráfico da tensão de saída em função da tensão de entrada tendo como base as alimentações de 0 e 5 Volts e uma tensão de referência de 4 Volts.

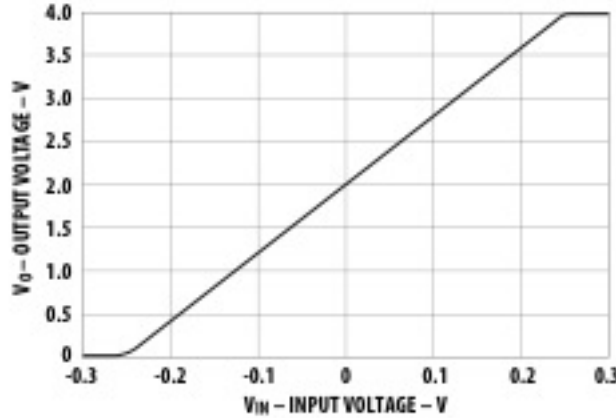


Figura 3.9: Tensão de saída em função da tensão de entrada. [?]

Observado o gráfico da figura 3.9 conclui-se que a tensão de offset na saída do sensor é metade da tensão de referência, o que juntamente com a gama de funcionamento da ADC permite concluir que o valor pretendido para o offset é de 1,65 V. Como tal a tensão de referência terá de ser 3,3 V. Inerente a esta tensão de referência está a introdução de um ganho dado por:

$$G = \frac{V_{ref}}{0,512V} = \frac{3,3V}{0,512V} = 6,44V/V \quad (3.6)$$

Uma vez que o circuito se encontra sujeito a picos de tensão é importante garantir o seu normal funcionamento neste caso, ou seja, para a tensão máxima estipulada, 400 V, temos:

$$V_{pico,max} = 400V * \sqrt{2} \approx 566V \quad (3.7)$$

Por conseguinte optou-se por dimensionar o circuito para uma tensão máxima de 600 V.

Apesar do sensor em questão possuir uma gama máxima de funcionamento de ± 2 V entre as suas entradas optou-se por seguir as recomendações do seu datasheet de modo a garantir o seu melhor funcionamento. Para uma gama de funcionamento de $\pm 200mV$ e uma tensão máxima de 600 V foi necessário introduzir na entrada um ganho de:

$$G_{Tensao} = \frac{200mV}{600V} \approx 3,33 * 10^{-4}V/V \quad (3.8)$$

Tendo como objetivo a obtenção deste ganho utilizou-se o divisor resistivo da figura 3.8 cujo ganho real é de aproximadamente $3,30 * 10^{-4}V/V$. A diferença entre o ganho pretendido e o ganho real justifica-se pela limitação dos valores das resistências existentes em armazém. Por fim é importante referir que a escolha da resistência de $1M\Omega$ teve como objetivo tornar a corrente no divisor resistivo irrelevante.

Uma vez que o principal objetivo deste projeto consiste no desenvolvimento de uma bancada que possibilite a elaboração de testes de performance a qualquer motor elétrico, dentro das imitações dos sensores utilizados, foi necessário introduzir eletrónica adicional de modo a permitir a medição das tensão nas diferentes fases dos motores trifásicos independentemente da sua configuração.

A figura 3.10 ilustra uma configuração em triângulo e estrela. No caso da configuração em estrela verifica-se a existência de um ponto comum às três fases, o neutro. Por conseguinte a medição das tensões em cada fase é efetuada em relação a este ponto comum. No segundo caso não se verifica um ponto comum sendo então necessário efetuar a medição em relação à fase mais próxima.

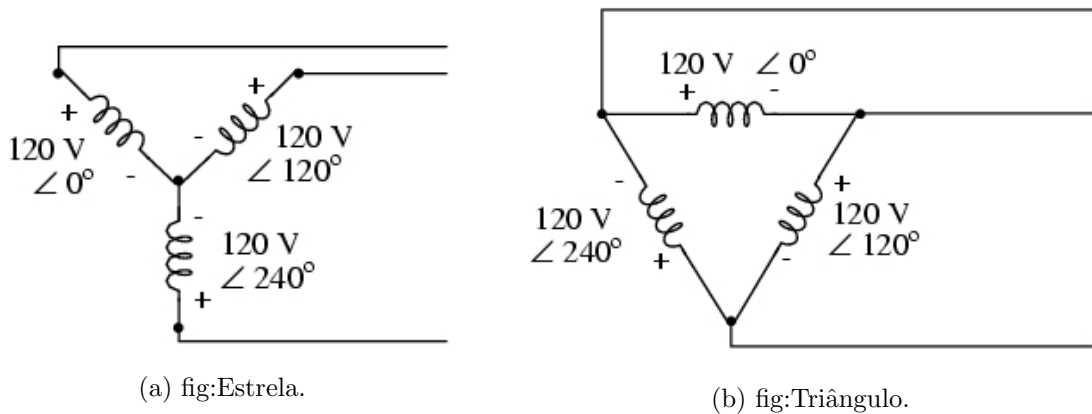


Figura 3.10: Configurações trifásicas. [16]

Para a comutação entre estas duas configurações foi utilizado o relé da figura 3.11 permitindo assim permutar entre a resistência de $1\text{M}\Omega$ ligada a uma fase ou ao neutro. Esta comutação é efetuada pelo circuito de controlo da figura 3.12 que atua no relé dependendo do estado da porta RD4 do Peripheral Interface Controller (PIC).

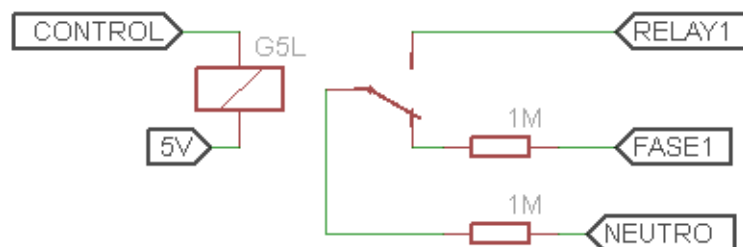


Figura 3.11: Circuito dos relés

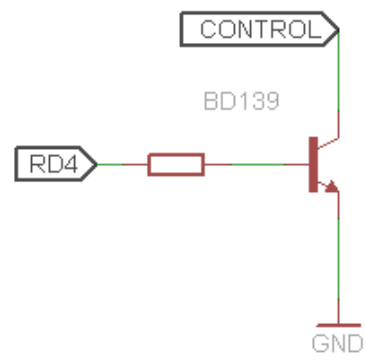


Figura 3.12: Circuito de controlo dos relés

3.3.3 Motor de carga

Como já foi referido na descrição da arquitetura deste projeto foi necessário recorrer à utilização de um motor capaz de impor uma variação de torque no motor em teste. Adquiriu-se o motor da figura 3.13 cujas suas principais características podem ser analisadas na tabela 3.4.



Figura 3.13: Motor de carga com motor em testes acoplado

Tensão de rede	380/400
Potência nominal	3 kW
Velocidade nominal	2860 Rotações por minuto (RPM)
Velocidade máxima/mínima	-999 / 9999 RPM
Torque nominal	10 Nm
Torque máximo suportado	400 % do torque nominal
Corrente nominal	6,84 A
Eficiência	82 %

Tabela 3.4: Características do motor de carga.

Paralelamente adquiriu-se também o inversor da empresa Nord modelo SK520 [18] visível na figura 3.14 cujas suas funcionalidades permitem, entre outras coisas, controlar o valor de torque imposto ao motor em teste e ler em tempo real o seu torque e velocidade. Finalmente é importante referir que o inversor em questão pode ser controlado por software através de uma comunicação série.



Figura 3.14: Inversor utilizado no controlo do motor de carga

Protocolo de comunicação do inversor

O inversor utilizado permite uma comunicação série utilizando o protocolo da Siemens USS (Universal Serial Interface) [17]. Este consiste num protocolo master-slave com um máximo de 32 nós em que o master é único e fixo. A comunicação é efetuada por tramas de tamanho variável sendo que cada slave, com endereço único, apenas possui a capacidade de efetuar a transmissão de uma trama após a receção de um pedido por parte do master. Esta transmissão apenas existe entre master e slave e pode ser cíclica, isto é, com intervalos de tempo entre tramas fixos, ou acíclica, sendo neste caso os intervalos de tempo variáveis. Por fim o slave apenas responde ao pedido recebido se a trama não possuir erros e o seu endereço corresponde ao slave em questão.

A figura 3.15 representa a estrutura geral de uma trama do protocolo USS.

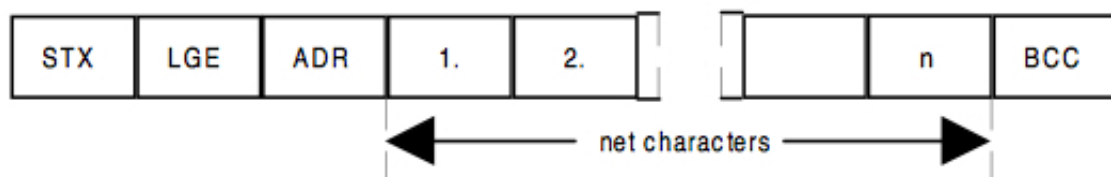


Figura 3.15: Trama do protocolo USS. [17]

Esta independentemente do número de bytes de dados enviados engloba sempre os seguintes bytes:

- start byte (STX), indicativo do início da trama;
- tamanho (LGE) da trama, indicativo do tamanho da trama excepto os bytes STX e LGE;

- endereço (ADR), indicativo do endereço de destino da trama;
- block check character (BCC), consistindo no XOR de todos os bytes da trama tendo com função permitir detectar a existência de erros na trama recebida.

Uma vez identificada a estrutura das tramas torna-se necessário identificar os tempos inerentes à sua transmissão. O "Start Interval", visível na figura 3.16, representa o tempo entre tramas e tem como função auxiliar a detecção de início de trama. Este intervalo torna-se fundamental no caso em que um ou mais bytes de dados da trama são idênticos ao STX sendo então imposto por este intervalo a condição de que o STX não pode ser antecedido de qualquer byte. Este tempo consiste no tempo de transmissão de dois STX. O outro tempo observável na figura 3.16 representa o tempo máximo que um master fica recetivo à receção da resposta a um pedido por si efetuado. Terminado este tempo o master assume a existência de um erro e procede a novo envio do pedido.

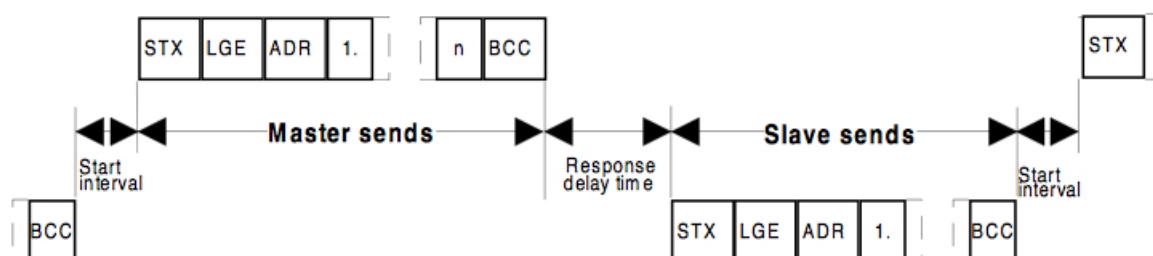


Figura 3.16: Tempos de transmissão de tramas. [17]

Até este momento foi descrito o protocolo USS num caso geral sendo agora necessário abordar este protocolo tendo em vista do inversor utilizado. A tabela 3.5 ilustra os diferentes tamanhos de tramas aceites pelo inversor em questão, no entanto de modo a facilitar a comunicação optou-se pela utilização das tramas Parameter Process data Objects (PPO) 0 para a transmissão de dados de processamento e parâmetros de informação do master para o slave (inversor) e as PPO 4 para o comando do motor de carga e envio do respetivo setpoint.

Tipo	LGE	Função
PPO 0	12	Trama standard contendo dados de processamento, três "setpoints" e um valor de parâmetro de 32 bits
PPO 1	14	Trama contendo dados de processamento e um valor de parâmetro de 32 bits
PPO 2	18	Trama contendo um maior número de dados de processamento e um valor de parâmetro de 32 bits
PPO 3	6	Trama contendo dados de processamento e o "setpoint" primário
PPO 4	10	Trama contendo dados de processamento e os "setpoints" primário e secundário

Tabela 3.5: Tamanho das tramas do inversor.

A figura 3.17 representa por intermédio de diagramas a construção de cada PPO. Para este projeto é importante analisar as tramas PPO 0 e 4. A trama PPO 0 é constituída por Paramater Label Value (PKW) e Process Data (PZD).

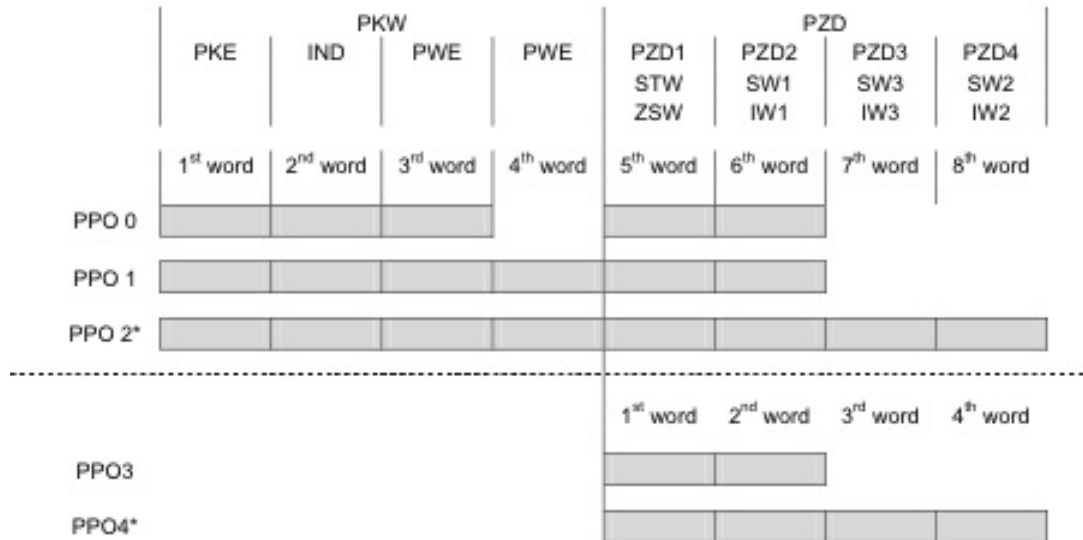


Figura 3.17: Representação dos diferentes PPO. [17]

O PKW é constituído pelas seguintes três palavras de dois bytes cada:

- o Parameter Label (PKE), indica a função e o parâmetro a ser endereçado;
- Index (IND), indica o índice do parâmetro a ser endereçado;
- Parameter Value (PWE)1, indica o valor do parâmetro a ser alterado.

A segunda parte da trama PPO 0 é constituída por duas palavras sendo estas dependentes da entidade responsável pela origem da trama, no entanto tendo em conta que este tipo de trama apenas será utilizado para o envio de parâmetros ou pedido de valores de torque e velocidade o PZD é, neste caso, irrelevante.

Analisando o outro tipo de trama utilizado, PPO 4, tem-se que esta é apenas constituída pelo PZD. Neste são importantes a STW e a Setpoint (SW)2, responsáveis pelo controlo do motor de carga e pelo setpoint, respetivamente. As tabelas da figura 3.18 e 3.19 ilustram detalhadamente os diferentes bits e as respetivas funções das palavras STW e ZSW.

Bit	Val.	Meaning	Comment
0	0	OFF 1	Ramp down as defined for braking, with disconnection from supply at $f = 0\text{Hz}$
	1	ON	Ready for operation
1	0	OFF 2	Cut off the voltage; the inverter output voltage is switched off; the FI enters a state where starting is disabled .
	1	Operating condition	OFF 2 is cancelled
2	0	OFF 3	Quick stop within programmed quick stopping period; with disconnection from supply at $f = 0\text{Hz}$; the FI switches to starting disabled condition.
	1	Operating condition	OFF 3 is cancelled
3	0	Disable operation	Cut off the voltage; the inverter output voltage is switched off; the FI switches to the state of being started
	1	Enable operation	The output voltage is enabled; ramping up to the setpoint applied
4	0	Disable ramp generator	Ramp generator is set to zero; no disconnection from supply at $f = 0\text{Hz}$; FI remains in the operation enabled state
	1	Operating condition	Ramp generator is enabled
5	0	Stop ramp generator	The setpoint currently provided by the ramp generator is "frozen" (the frequency is maintained at a constant value).
	1	Enable ramp generator	The setpoint is enabled on the ramp generator.
6	0	Disable setpoint	Selected setpoint is set to zero on the ramp generator.
	1	Enable setpoint	Selected setpoint is activated on the ramp generator.
7	0		
	1	Acknowledge	A change of value from 0 to 1 ensures that faults which are no longer active are acknowledged. Note: When a digital input has been programmed to execute the "Ack.fault" function, this bit must not be permanently set to 1 over the bus (otherwise edge evaluation would be prevented).
8	0/1		Pre-assigned
9	0/1		Pre-assigned
10	0	PZD invalid	The transmitted process data are invalid.
	1	PZD valid	The process data being transferred from the master are valid. Note: If setpoints exclusively are transmitted via the bus (setting : interface) this bit must have been set to ensure that the transmitted setpoint becomes valid.
11	0		
	1	Pos. phase sequence	Positive phase sequence ON
12	0		
	1	Neg. phase sequence	Negative phase sequence ON
13	0/1		Pre-assigned
14	0/1	Bit 0 to switch parameter set	<div>00 - Parameter set 1</div> <div>01 - Parameter set 2</div> <div>10 - Parameter set 3</div> <div>11 - Parameter set 4</div>
15	0/1	Bit 1 to switch parameter set	

Figura 3.18: Constituição do STW. [17]

Bit	Val.	Meaning	Comment	
0	0	Not ready to start	Initialization completed, charging relay ON, output voltage disabled	
	1	Ready to start		
1	0	Not ready for operation	Causes: no command has been activated, fault being signalled, OFF2 or OFF 3 being applied, starting disabled state being applied	
	1	Ready for operation	ON command being applied, absence of fault signal. With the ENABLE OPERATION command the inverter can be started	
2	0	Operation disabled	Output voltage is enabled; motor is accelerated to the applied setpoint	
	1	Operation enabled		
3	0	No trouble	Drive failure resulting in stoppage; this state will change to starting disabled after the fault has been successfully acknowledged	
	1	Trouble		
4	0	OFF 2	OFF 2 command is applied	
	1	Absence of OFF 2		
5	0	OFF 3	OFF 3 command is applied	
	1	Absence of OFF 3		
6	0	Starting not disabled	Switches first to OFF1 then to ready-to-start condition	
	1	Starting disabled		
7	0	Absence of warning	Drive operation continues, no acknowledgement required	
	1	Warning		
8	0	Actual value not o.k.	Actual value does not match the setpoint (with <i>posicon</i> : failure to reach setpoint position)	
	1	Actual value o.k.	Actual value does match the desired setpoint value (setpoint has been equalled) (with <i>posicon</i> : setpoint position has been reached)	
9	0	Local management	Device performing management locally Guidance active locally on the device	
	1	Management requested	The master is requested to assume network management.	
10	0	Actual MFR 1 value below reference value	Programmed function of MFR 1 has not been executed or in other words actual value < programmed reference value	
	1	MFR 1 reference value has been equalled	Programmed function of MFR 1 has been executed or in other words actual value > programmed reference value	
11	0		The inverter output voltage rotating field is turning right	
	1	Pos. phase sequence		
12	0		The inverter output voltage rotating field is turning left	
	1	Neg. phase sequence		
13	0	Actual MFR 4 value below reference value	Only with SK 700E with <i>posicon</i> extension: state of MFR 4 = 0	
	1	MFR 4 reference value has been equalled	Only with SK 700E with <i>posicon</i> extension: state of MFR 4 = 1	
14	0/1	Currently active parameter set 0	00 - Parameter set 1 01 - Parameter set 2	10 - Parameter set 3 11 - Parameter set 4
15	0/1	Currently active parameter set 1		

Figura 3.19: Constituição do ZSW. [17]

Para o desenvolvimento da bancada de testes foi necessário alterar o parâmetro 547 para a opção "Torque servo mode" permitindo assim indicar, por intermédio do setpoint, o valor de torque a ser imposto ao motor em teste. Este corresponde a um número inteiro compreendido entre -32768 e 32767 (8000 hex e 7FFF hex) sendo o valor 16384 (4000 hex) equivalente a 100%. Por sua vez um setpoint de 100% é equivalente ao torque nominal do motor de carga.

Por fim falta abordar a configuração do inversor de modo a permitir o controlo total do

motor através da comunicação série. A tabela 3.6 ilustra os parâmetros que necessitam de ser alterados assim como a sua descrição e valores finais.

Parâmetros	Valor	Descrição
503	1	Modo de controlo do Master
509	2	Interface utilizado
511	1	Baud rate
512	0	Endereço do inversor (slave)
547	10	Função do setpoint 2

Tabela 3.6: Parâmetros de configuração do inversor.

3.4 Design de software

Para o desenvolvimento do Software e firmware desta dissertação foram utilizadas duas linguagens. A nível do microcontrolador foi utilizada a linguagem C uma vez que esta representa a linguagem mais utilizada na programação de microcontroladores. De modo a facilitar a sua programação foi utilizado o compilador da microchip MPLAB X [19] e o PicKit 3 [19].

Para o desenvolvimento da aplicação optou-se por escolher uma linguagem frequentemente utilizada na elaboração de programas com interfaces gráficas. Tendo em conta a diversidade de opções resolveu-se adotar uma linguagem recente com fácil acesso a bibliotecas e informação, o C# .net. Por fim foi utilizado, juntamente com a linguagem C# .net, a aplicação Visual Studio 2012 da Microsoft [20] com o intuito de facilitar o desenvolvimento de toda a interface gráfica.

3.4.1 Firmware

Visto que a placa utilizada com o microcontrolador escolhido contém todos os componentes necessários à comunicação série, por intermédio de um cabo USB/mini-USB utilizou-se bibliotecas já desenvolvidas para as bases da comunicação série. Pode-se então repartir o desenvolvimento do firmware em duas partes:

A primeira cifra-se na configuração do microcontrolador com o objetivo de ler os dados da ADC e intervir no circuito da bancada de testes. Neste campo optou-se por configurar a ADC de modo a que o valor obtido consista na média de 16 amostras consecutivas. A intervenção no circuito da bancada de testes efetua-se através da ativação e desativação de uma porta de saída conectada ao circuito do sensor de tensão, previamente descrito.

A segunda parte engloba toda a comunicação entre o microcontrolador (Slave) e a aplicação desenvolvida (Master). Concebeu-se um protocolo de comunicação Master-Slave cuja estrutura da trama é visível na figura 3.20. As siglas STX e EOT indicam o início e final da trama e os seus valores são, em hexadecimal, 0x02 e 0x04, respectivamente.

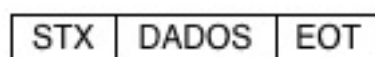


Figura 3.20: Estrutura da trama

Continuando a análise da estrutura da trama verifica-se que os seus dados não se encontram descritos detalhadamente. Tal deve-se ao facto do seu tamanho e estrutura variar dependendo da sua função. Sendo assim pode-se identificar três funções gerais da trama:

- (a) o comando enviado para o microcontrolador (Slave);
- (b) o envio de Acknowledge (ACK);
- (c) e o envio dos valores lidos pela ADC.

Nas primeiras duas funções (a, b) o tamanho dos dados da trama reduz-se a um byte sendo que os comandos aceites pelo microcontrolador e suas respectivas funções encontram-se visíveis na tabela 3.7. No caso em que é enviado um ACK a parcela dos dados consiste no valor, em hexadecimal, de 0x06.

Comando	
S	Pedido de envio dos valores lidos pela ADC
C	Pedido de ativação da configuração em estrela
c	Pedido de ativação da configuração em triângulo

Tabela 3.7: Comandos do microcontrolador.

Na ultima função (c) são enviados os valores obtidos através da conversão dos sinais provenientes dos sensores de tensão e corrente efetuada pela ADC. Tendo em conta que o poder de processamento do computador cuja aplicação desenvolvida estará instalada é muito superior ao do microcontrolador optou-se por efetuar todo processamento necessário na aplicação. Sendo assim e uma vez que a ADC utilizada é de 10 bits conclui-se que os valores enviados serão números inteiros compreendidos entre 0 e 1023. Torna-se então necessário compreender como são identificados os valores enviados.

Observando a figura 3.21 verifica-se que a separação entre os dados é efetuada com recurso ao envio de uma vírgula e a posição dos diferentes valores é fixa, isto é, o valor da corrente lida no sensor 1 é enviado sempre na posição C1, no sensor 2 é enviada na posição C2 e assim consecutivamente.

0x02	C1	,	C2	,	C3	,	V1	,	V2	,	V3	,	F1	,	F2	,	F3	0x04
------	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	------

Figura 3.21: Estrutura da trama no envio dos valores lidos pela ADC.

Finalmente a figura 3.22 tem como objetivo exemplificar ao leitor a comunicação entre o programa desenvolvido e o microcontrolador. As Siglas C1, C2, C3, V1, V2, V3 e F1, F2, F3 representam os valores obtidos pelo microcontrolador para as correntes, tensões e desfasamento entre a corrente e tensão, respectivamente.

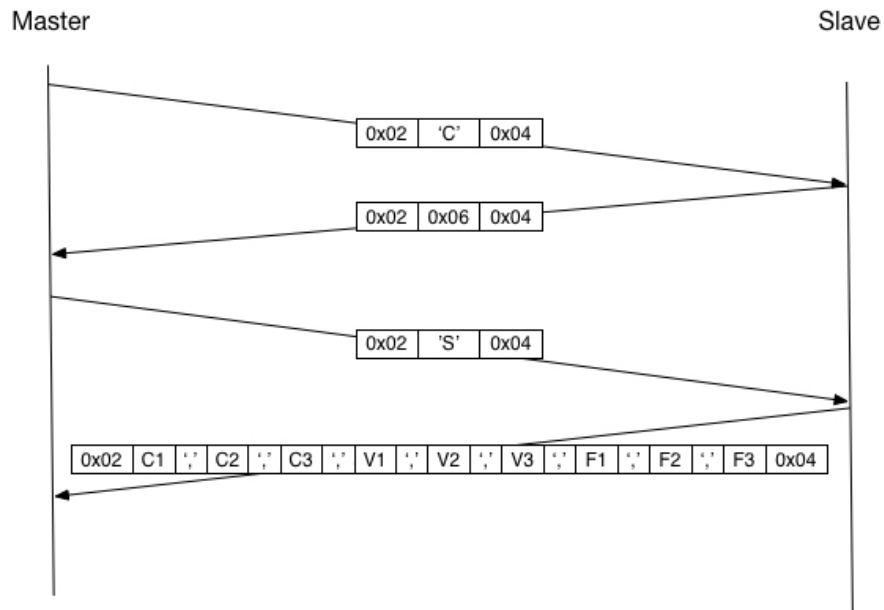


Figura 3.22: Exemplificação da comunicação entre o microcontrolador (Slave) e o programa (Master)

3.4.2 Aplicação

Uma vez que o programa desenvolvido é responsável pelo controlo dos diversos componentes da bancada de testes optou-se por efetuar uma divisão em módulos com o objectivo de facilitar o seu entendimento.

A figura 3.23 ilustra o início do funcionamento da aplicação que após acionado o botão 'Start' procede ao envio da configuração escolhida para alimentação do motor em teste. Aquando da receção do ACK indicando que a configuração foi efetuada o sistema entra no estado 'ON'. Este consiste no primeiro estado aquando da iniciação do pedido de valores ao microcontrolador e inversor.

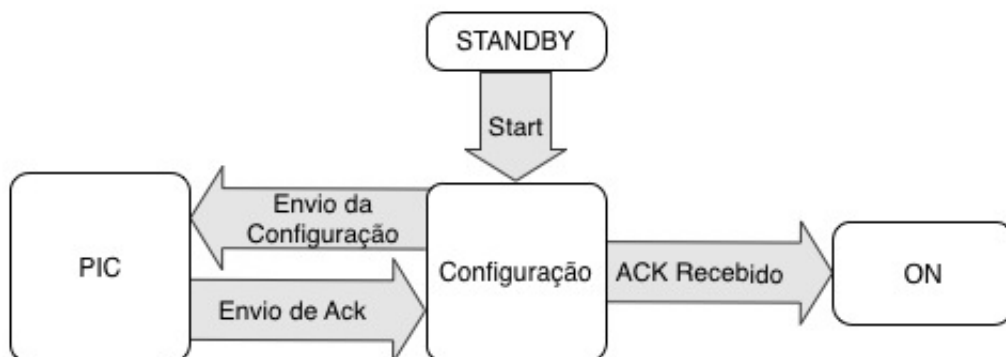


Figura 3.23: Funcionamento inicial do programa desenvolvido.

A figura 3.24 representa o funcionamento do programa enquanto a opção de finalização de recepção de dados não for acionada. Sendo assim são efetuados os pedidos dos dados ao microcontrolador e inversor ficando o programa em espera num estado adormecido. Este é obtido através da utilização de eventos que aquando da recepção de dados nas portas séries configuradas executa um código predefinido do programa. Neste caso é efetuado o processamento dos dados que serão detalhadamente descritos mais à frente nesta dissertação.

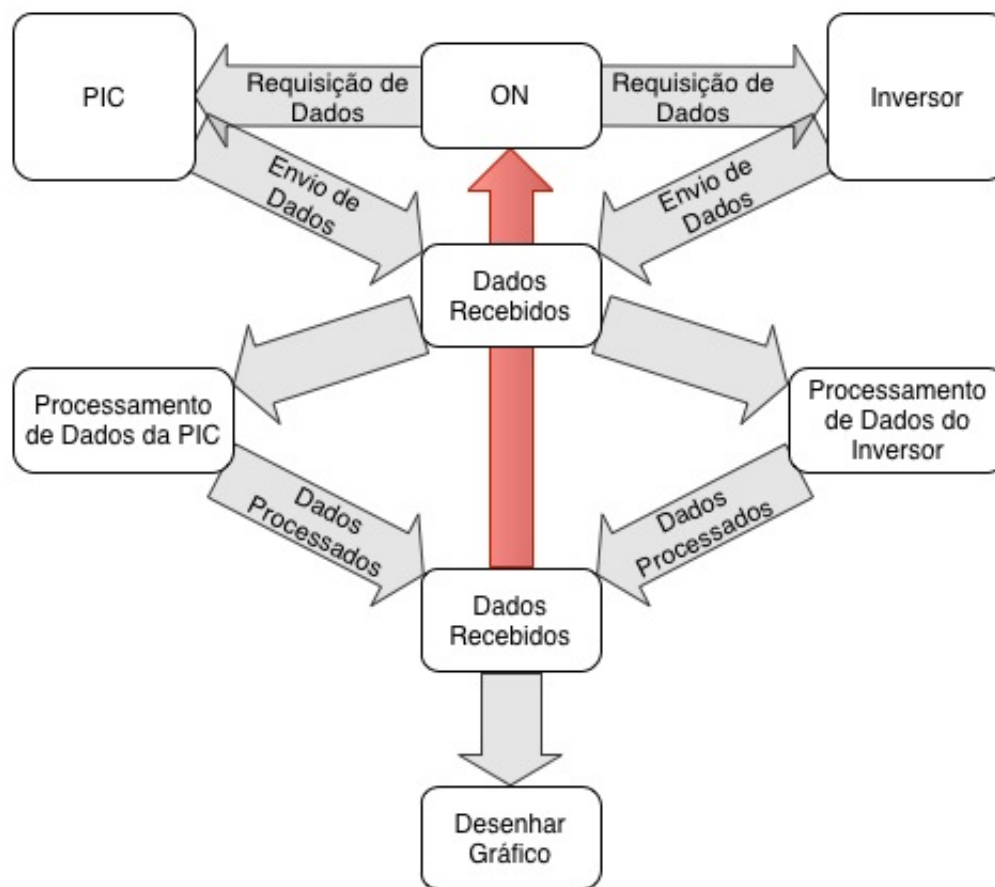


Figura 3.24: Funcionamento da aplicação desenvolvida

Finalmente foi adicionado ao sistema da figura 3.24 o módulo da figura 3.25 cuja função consiste em indicar ao inversor do motor de carga o valor de torque a ser imposto ao sistema. Esta funcionalidade permite ainda efetuar dois tipos de comandos. O primeiro e mais simples permite ao utilizador impor um torque constante.

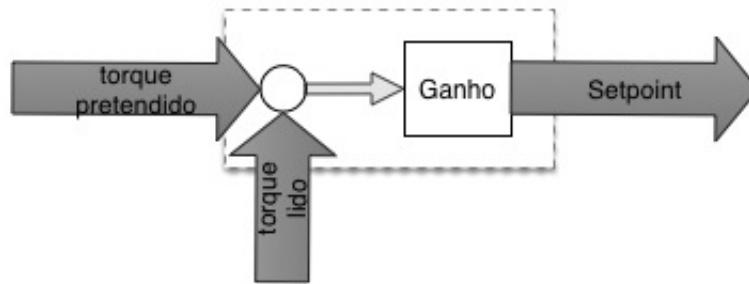


Figura 3.25: Módulo de controlo do motor de carga

O segundo permite, através de uma interface gráfica, pré-visualizar uma curva de torque que será imposta ao sistema aquando da sua ativação. Neste caso foi implementado, por software, um controlador proporcional que consiste na multiplicação da diferença entre o valor de torque lido e o pretendido por um ganho. Como resultado é obtido um novo setpoint enviado para o inversor do motor de carga após cada ciclo de funcionamento de aplicação.

A figura 3.26 ilustra o workflow final da aplicação desenvolvida desde o momento em que o utilizador ativa a aplicação pressionando o botão Start. Finalmente tem-se que o torque pretendido em ambas as funcionalidades é calculado em percentagem do seu valor nominal para o motor de carga utilizado. Tal facto permite a utilização, caso necessário, de diferentes motores de carga sendo apenas relevante a configuração do inversor utilizado.

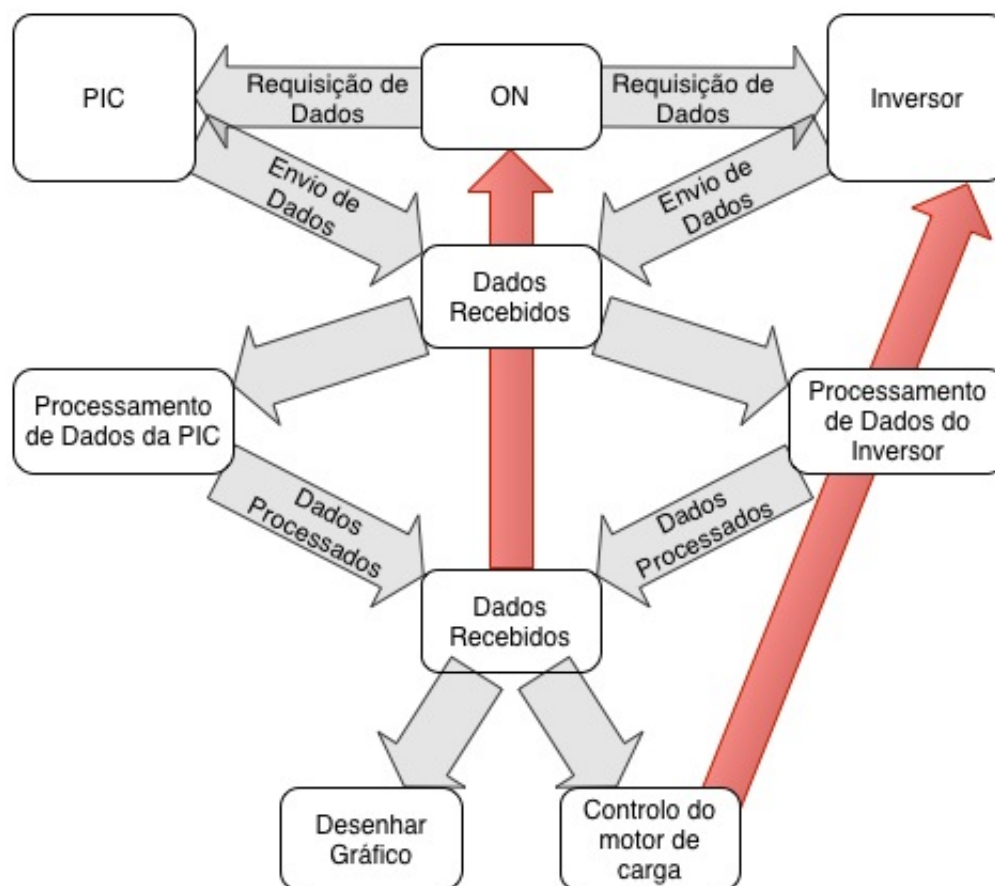


Figura 3.26: Funcionamento da aplicação desenvolvida

Uma vez que se pretende obter a máxima frequência de amostragem possível optou-se pela realização de multi-threading na execução do processamento dos dados, isto é, tendo em conta que os eventos de chegada dos dados provenientes do microcontrolador e do inversor se encontram temporalmente muito próximos procedeu-se à programação do seu processamento de modo a que estes sejam executados paralelamente. Consequentemente o programa aguarda a finalização destes processos para efetuar o cálculo do rendimento. Por fim são efetuadas, novamente, duas atividades em paralelo, sendo elas o desenho do gráfico visível pelo utilizador e o início de um novo ciclo representado pela seta a vermelho.

Processamento de dados

Esta secção tem como objetivo descrever todos os cálculos efetuados na obtenção dos valores reais de corrente, tensão, torque e velocidade. Como tal começamos por analisar o processamento dos dados recebidos pelo microcontrolador.

Tendo em conta que as tensões e correntes são sujeitas a diversas alterações até ao seu processamento optou-se por subdividir o seu cálculo em 3 blocos.

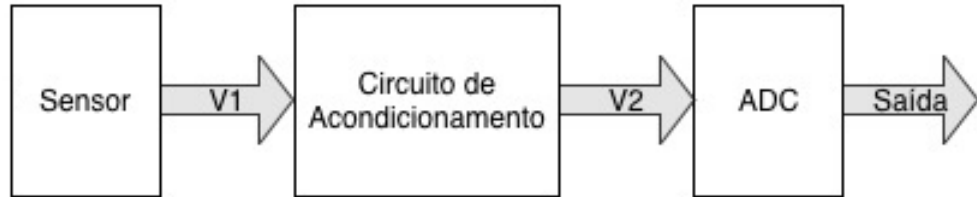


Figura 3.27: Diagrama de blocos do processamento de dados do microcontrolador para a corrente

Analisando a figura 3.27 para o caso das correntes verifica-se que o primeiro bloco consiste na saída do sensor de corrente, ou seja, a sua sensibilidade e offset. Com isto tem-se que a tensão em V_1 é dada por:

$$V_1 = 32,7mV * I_{Entrada} + 3V \quad (3.9)$$

Passando para o segundo bloco tem-se que V_2 consiste no valor de tensão do sinal após o seu acondicionamento, que no caso da corrente consiste na introdução de um ganho, previamente calculado, que é dado pela equação 3.1. Sendo assim tem-se que V_2 é dado por:

$$V_2 = V_1 * G_{Corrente} \quad (3.10)$$

O último bloco tem como finalidade transformar a tensão até este momento obtida num valor inteiro compreendido entre 0 e 2^n , sendo n o número de bits da ADC. Assim sendo procedeu-se ao cálculo da sua resolução tendo em conta que a sua gama de funcionamento é 0 a 3,3 V.

$$Res = \frac{3,3}{2^n - 1} = \frac{3,3}{2^{10} - 1} = 0,0032V \quad (3.11)$$

Posto isto tem-se que o resultado da conversão da ADC (S) será um valor inteiro compreendido entre 1 e 1023 dado por:

$$S = \frac{V_2}{Res} \quad (3.12)$$

Substituindo as equações e resolvendo a equação 3.9 em ordem a I tem-se que a corrente é dada por:

$$I_{Entrada} = \frac{\frac{S * Res}{G_{Corrente}} - 3}{32,7 * 10^{-3}} \quad (3.13)$$

Para o caso da tensão é necessário efetuar a troca do circuito de acondicionamento e o sensor de tensão uma vez que a tensão medida é inicialmente reduzida por forma a possibilitar que o sensor de tensão escolhido faça a leitura do mesmo. O sinal resultante deste já se encontra compreendido na gama de funcionamento da ADC não sendo assim necessário qualquer acondicionamento adicional.

O primeiro bloco consiste no divisor resistivo cujo ganho é calculado pela equação 3.8 e o seu valor é $3.33 * 10^{-4} V/V$. Sendo assim temos que:

$$V_1 = V_{Entrada} * G_{Tensao} \quad (3.14)$$

Seguidamente temos o sensor de tensão que, tal como já foi referido anteriormente, introduz um offset e um ganho dependente da tensão de referência imposta. Uma vez que esta é de 3,3 V tem-se que:

$$V_{Offset} = \frac{V_{ref}}{2} = \frac{3,3V}{2} = 1,65V \quad (3.15)$$

$$G = \frac{V_{ref}}{0,512V} = \frac{3,3V}{0,512V} = 6,44V/V$$

Com isto tem-se que V_2 é dado por:

$$V_2 = V_1 * G + V_{Offset} \quad (3.16)$$

O último bloco foi previamente analisado nos sensores de corrente tendo-se concluído que o resultado da conversão da ADC (S) é dado por:

$$S = \frac{V_2}{Res}$$

Substituindo as equações e resolvendo a equação 3.14 em ordem a $V_{Entrada}$ tem-se que a tensão é dada por:

$$V_{Entrada} = \frac{S * Res - 1,65}{G * G_{tensao}} \quad (3.17)$$

Finalizada a descrição dos procedimentos utilizados para a obtenção dos valores reais de corrente e tensão é necessário efetuar o cálculo da potência fornecida ao motor. Por conseguinte foi tido em conta o tipo de alimentação do motor podendo este ser DC ou trifásico (AC). No primeiro caso a potência é facilmente obtida através do produto da tensão e corrente.

$$P_{Entrada} = V_{Entrada} * I_{Entrada} \quad (3.18)$$

Para uma alimentação trifásica é importante ter em conta que os valores de tensão e corrente encontram-se desfasados entre fases 120 graus podendo ser positivos ou negativos num determinado instante. Por conseguinte a potência fornecida ao motor é dada pelo somatório das potências de cada fase.

$$P_{Entrada} = V_{fase1} * I_{fase1} * \cos(\Phi_1) + V_{fase2} * I_{fase2} * \cos(\Phi_2) + V_{fase3} * I_{fase3} * \cos(\Phi_3) \quad (3.19)$$

, sendo Φ_1 , Φ_2 e Φ_3 o desfasamento entre a tensão e a corrente para cada uma das fases.

Analisando agora o processamento dos valores de torque e velocidade recebidos do inversor temos que recorrendo à análise já efetuada do protocolo de comunicação entre a aplicação e o inversor estes são enviados nos bytes 7 e 8 da trama de resposta ao pedido do respetivo parâmetro. Sendo assim é necessário converter esses dois Bytes num valor decimal. A equação 3.20 demonstra esse cálculo após a conversão dos Bytes de hexadecimal para decimal.

$$Val = 256 * Byte(7) + Byte(8) \quad (3.20)$$

Analisando o manual do inversor verifica-se que para o caso da velocidade não é necessário efetuar qualquer alteração ao valor obtido uma vez que este já se encontra em rotações por minuto. O mesmo não se verifica no caso do valor de torque pois este constitui uma percentagem entre 0 e 400% sendo que 100% é equivalente ao torque nominal do motor de carga. Com isto tem-se que o torque é dado por:

$$Torque = Val * 10/100 \quad (3.21)$$

Seguindo o mesmo procedimento temos que a potência real de saída do motor em teste é dada por:

$$P_{Saida} = \frac{Torque * Revs * 2\pi}{60} \quad (3.22)$$

Finalmente uma vez obtidas as potências de entrada e saída é efetuado o cálculo de rendimento do motor em teste. Este consiste na relação entre a potência entrada e saída do motor e calcula-se do seguinte modo:

$$R = \frac{P_{Saida}}{P_{Entrada}} \quad (3.23)$$

Interface do utilizador

Finalmente foi criada a interface gráfica visível na figura 3.28 com o intuito de permitir ao utilizador uma rápida e fácil interação com a bancada de teste desenvolvida. Esta foi desenvolvida com recurso aos componentes gráficos existentes na aplicação Microsoft Visual Studio 2012 permitindo ao utilizador controlar o motor e alguns dos seus parâmetros, configurar o hardware de acordo com o tipo de alimentação do motor em teste, proceder à calibração dos diferentes sensores, seleccionar as interfaces série utilizadas na comunicação da bancada de testes e escolher entre os diferentes gráficos a visualizar.

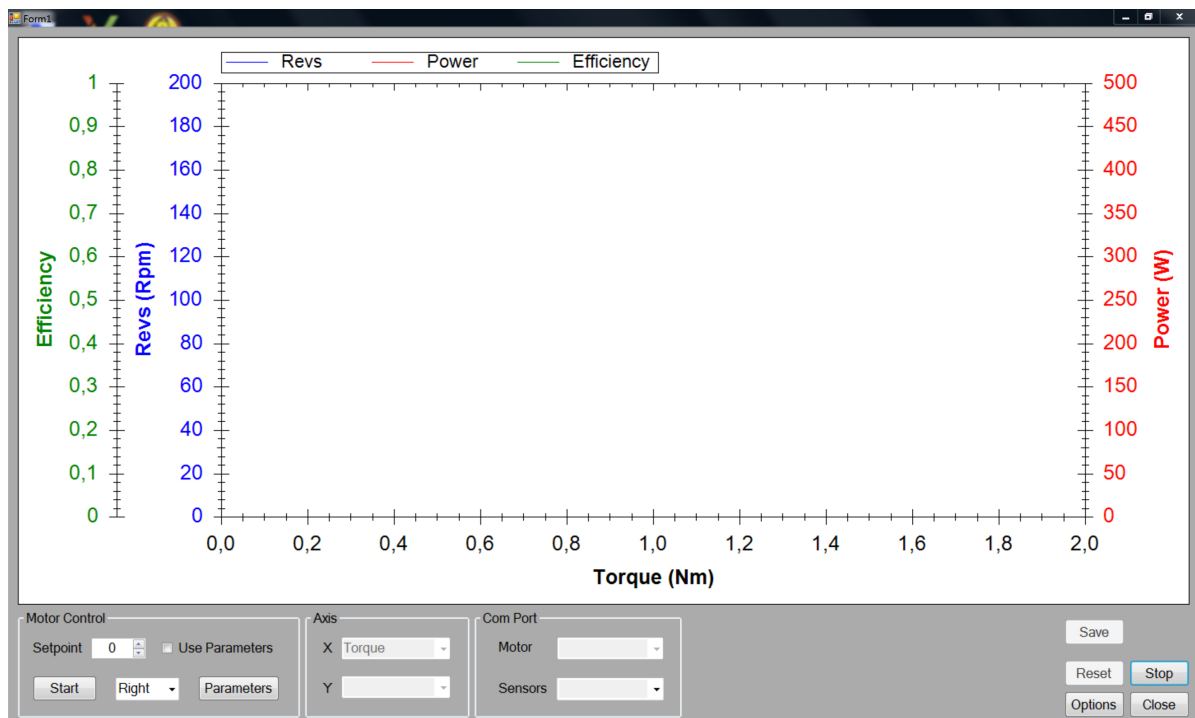


Figura 3.28: Janela principal da aplicação desenvolvida

A escolha do tipo de gráfico é necessariamente efetuada antes do início da aquisição de dados e estão disponíveis as seguintes opções:

- Torque vs Tempo
- Corrente vs Tempo
- Potência vs Tempo
- Velocidade vs Tempo
- Tensão vs Torque

Analisando mais detalhadamente a figura 3.28 temos o painel "Motor Control", figura 3.29 cujas suas funções permitem:

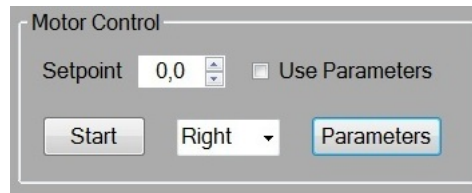


Figura 3.29: Opções do motor de carga

- Setpoint - Estabelecer um setpoint de torque compreendido entre -100% e 100 % do torque nominal do motor de carga utilizado;
- Estabelecer o sentido de rotação do motor de carga;
- Use Parameters - Impor ao motor de carga a curva de torque pré-definida;
- Start - Iniciar e finalizar a rotação do motor de carga.

O motor utilizado tem como função simular uma carga de forma a que através da aquisição de dados seja possível visualizar o comportamento do motor em estudo. Foi neste contexto que se procedeu ao desenvolvimento de uma interface gráfica capaz de pré-configurar o seu comportamento.

A interface gráfica visível na figura 3.30 permite ao utilizador pré-definir e visualizar a curva de torque que será imposta ao motor em estudo.

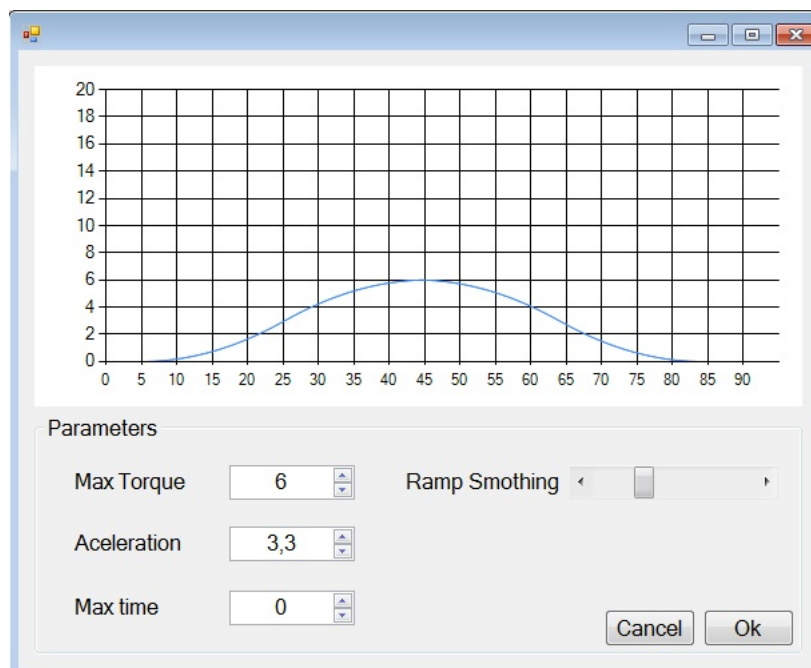


Figura 3.30: Parâmetros

Tal como já foi anteriormente referido, a bancada de testes desenvolvida tem como finalidade estudar os motores elétricos independentemente do seu tipo de alimentação. Assim sendo a figura 3.31 ilustra a interface gráfica responsável pela configuração da bancada de testes tendo em conta o tipo de alimentação do motor em estudo, isto é, corrente contínua ou alternada, e em caso de alimentação trifásica, configuração em estrela ou triângulo.

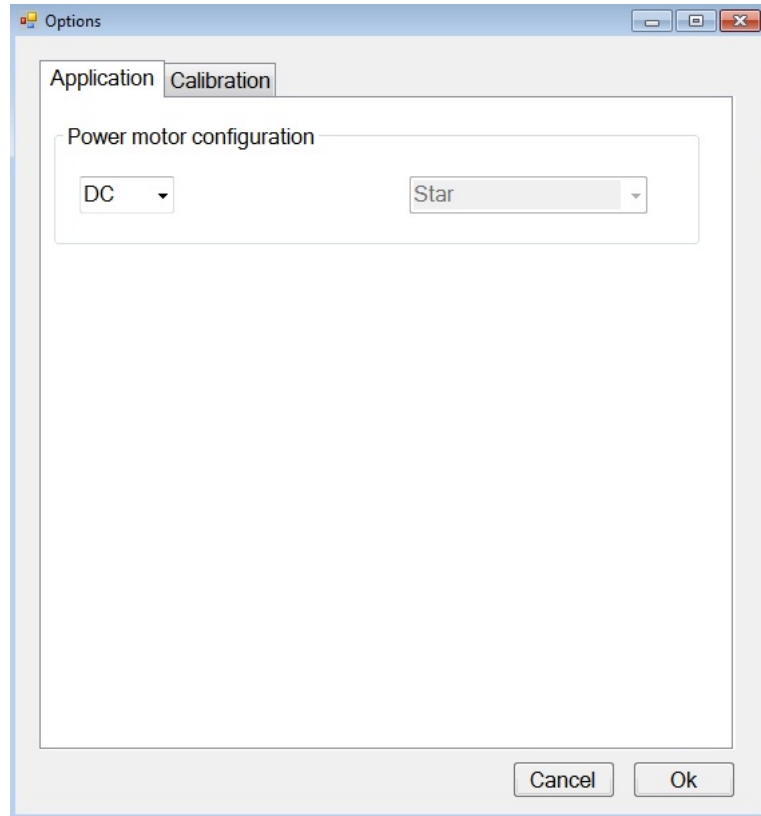


Figura 3.31: Opções

Tendo em conta que todos processos desenvolvidos para a obtenção dos diferentes dados estão inerentes à introdução de erros, sejam estes causados por ruído no sinal elétrico proveniente dos sensores ou arredondamentos efetuados no seu processamento computacional optou-se pela introdução de um módulo de calibração capaz de corrigir erros sistemáticos. A figura 3.32 permite ao utilizador introduzir um ganho e offset aos diferentes sensores sendo estes identificados pela sua respetiva porta no microcontrolador.

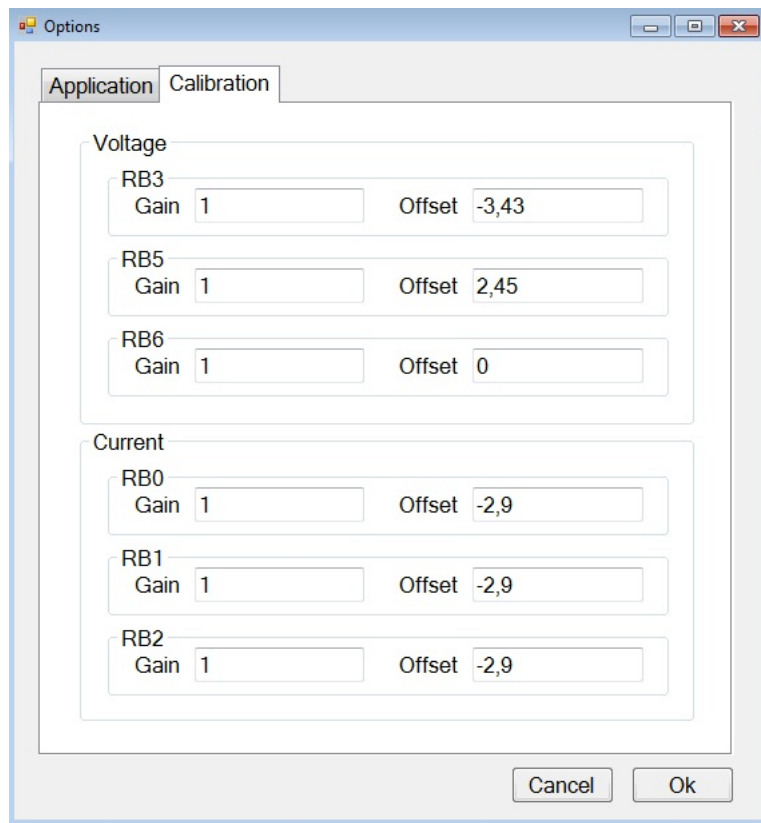


Figura 3.32: Calibração da bancada de testes

Uma vez efetuadas todas as configurações necessárias pode-se dar início à recolha de dados por parte da bancada de testes selecionando o botão "Start" da figura 3.28. São também dadas ao utilizador as seguintes opções:

- Save - Guardar dados recolhidos num ficheiro de texto;
- Reset - Reiniciar a aquisição de dados;
- Close - Encerrar a aplicação.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se apresentar todos os dados adquiridos na análise de um motor elétrico recorrendo à bancada de testes descrita. Para tal foi necessário, primeiramente, identificar erros sistemáticos no cálculo das grandezas por forma a garantir, através do módulo de calibração, a maior precisão possível dos valores obtidos. Esta apenas foi efetuada para os sensores de corrente e tensão devido à impossibilidade de leitura dos valores reais de torque e velocidade. No entanto a empresa Nord, responsável pela venda do motor de carga e seu inversor, garante a precisão dos valores medidos.

A figura 4.1 ilustra a bancada de testes desenvolvida sendo possível visualizar os diferentes elementos até este momento analisados. Uma vez efetuada a calibração procedeu-se à realização dos testes de performance a um motor elétrico monofásico tendo sido obtidas curvas de eficiência, corrente e potência.

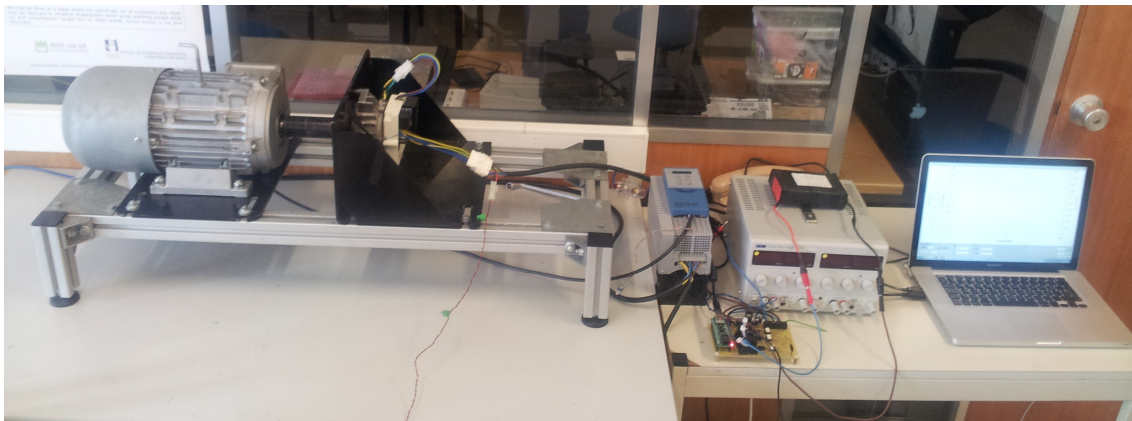


Figura 4.1: Bancada de testes desenvolvida

4.2 Testes de calibração

4.2.1 Testes de corrente

A elevada gama de funcionamento dos sensores de corrente constituiu um obstáculo na sua calibração devido à dificuldade de medição de valores quando estes representam correntes elevadas. Posto isto optou-se pela utilização de uma resistência de elevada potência, visível na figura 4.3 e a fonte de alimentação da figura 4.2. O valor de corrente é então calculado através da resistência e da queda de tensão na mesma recorrendo à primeira lei de Ohm. Este é então comparado com o valor obtido por intermédio da aplicação desenvolvida.

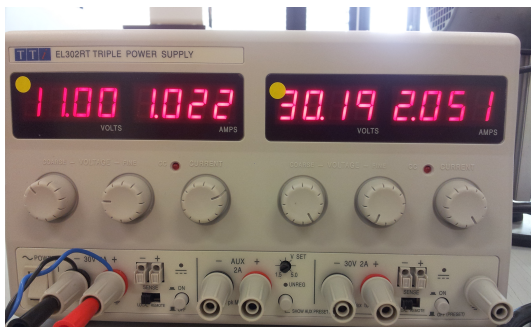


Figura 4.2: Fonte alimentação



Figura 4.3: Resistência de elevada potência com dissipador de calor

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.5 ilustram os valores obtidos, em Amperes, pela aplicação, $I_{Aplicacao}$, e pela medição da resistência e tensão, I_{fonte} . Uma vez obtidos os valores procedeu-se à realização de gráficos com o intuito de facilitar a sua análise e por conseguinte efetuar a calibração dos sensores. Assim sendo foi efetuado, para cada caso, uma regressão linear com o objetivo de obter os valores de calibração, isto é, o ganho e o offset necessário para a maior aproximação possível entre os dados obtidos e reais.

Resultados

I_{fonte} (A)	0,00	0,20	0,51	0,75	0,90	1,24	1,46	1, 66	1,93
$I_{Aplicacao}$ (A)	2,44	2,62	2,81	2,99	3,17	3,34	3,53	3,71	3,89

Tabela 4.1: Teste do sensor de corrente RB0

I_{fonte} (A)	0,00	0,23	0,47	0,74	0,91	1,16	1,37	1, 62	1,86
I Aplicação (A)	1,55	1,72	1,90	2,08	2,26	2,44	2,62	2,81	2,99

Tabela 4.2: Teste do sensor de corrente RB1

I_{fonte} (A)	0,00	0,17	0,39	0,63	0,83	1,15	1,33	1, 57	1,77
I Aplicação (A)	2,05	2,26	2,44	2,62	2,81	2,99	3,17	3,35	3,53

Tabela 4.3: Teste do sensor de corrente RB2

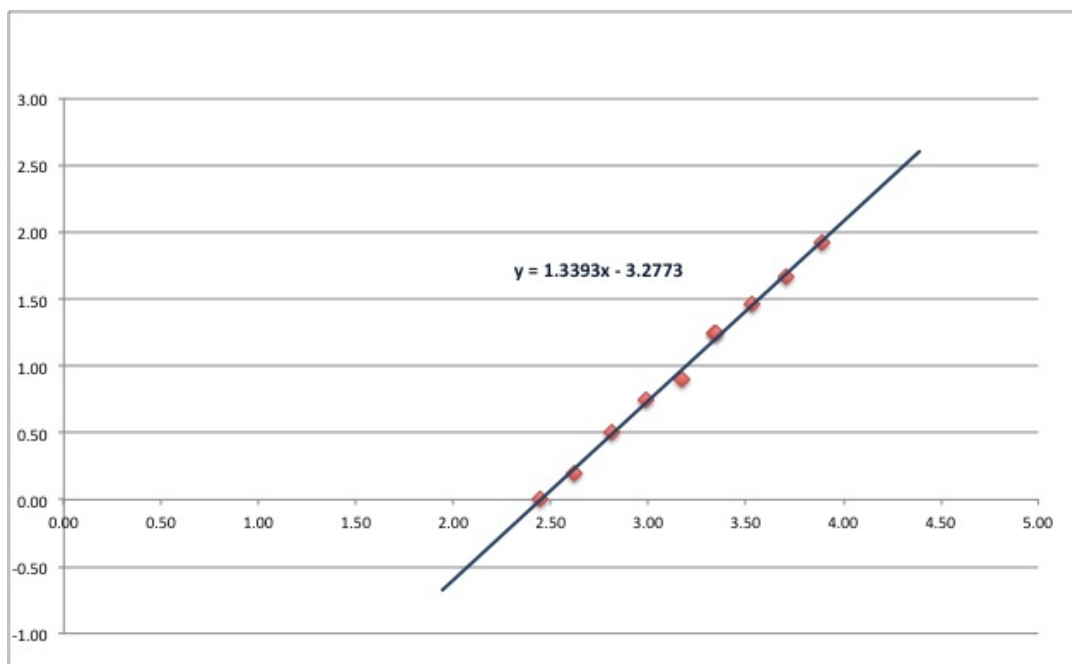


Figura 4.4: Gráfico da corrente obtida em função da medida para o sensor RB0

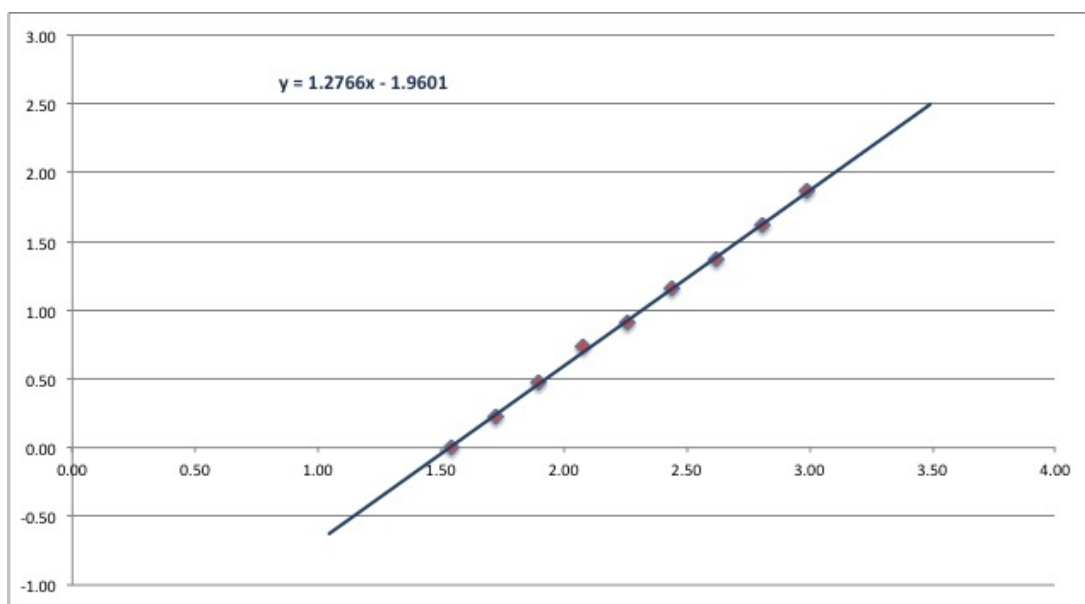


Figura 4.5: Gráfico da corrente obtida em função da medida para o sensor RB1

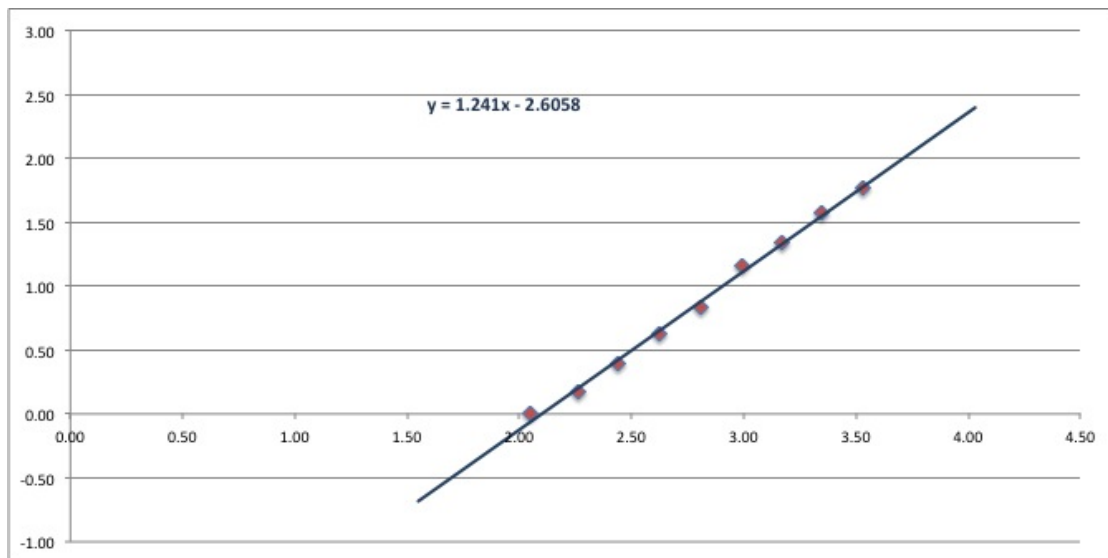


Figura 4.6: Gráfico da corrente obtida em função da medida para o sensor RB2

Conclusão

O método implementado na calibração dos diferentes sensores consiste, sucintamente, na introdução de um ganho e um offset no sistema por forma a permitir a correção de erros constantes e ou proporcionais na obtenção dos valores de corrente e tensão. Por conseguinte analisando os dados obtidos e seus gráficos conclui-se que utilizando os valores de m e b das regressões lineares ($Y = mx + b$) como ganho e offset no módulo de calibração é possível garantir a precisão dos valores de corrente obtidos na aplicação. A tabela 4.4 ilustra os valores de ganho e offset para os três sensores de corrente analisados.

Sensor	Ganho	Offset
RB0	1,339	-3,278
RB1	1,277	-1,96
RB1	1,241	-2,606

Tabela 4.4: Valores de calibração para os sensores de corrente

4.2.2 Testes de tensão

Para a realização da calibração dos sensores de tensão foi apenas necessário a utilização da fonte de alimentação da figura 4.2.

Após a obtenção dos valores das tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 procedeu-se, tal como na calibração dos sensores de corrente, à realização dos gráficos e suas respectivas regressões lineares tendo em conta os valores obtidos na aplicação e os medidos.

Resultados

$V_{fonte}(V)$	0,00	0,79	2,74	3,68	4,67	5,64	6,63	7,63	8,43
$V_{Aplicacao}(V)$	1,47	0,00	-1,47	-2,45	-3,43	-4,42	-5,40	-6,38	-7,36

Tabela 4.5: Teste do sensor de tensão RB3

$V_{fonte}(V)$	0,00	0,95	2,73	3,93	5,02	5,76	6,78	7,80	8,68
$V_{Aplicacao}(V)$	1,47	0,00	-1,47	-2,45	-3,43	-4,42	-5,40	-6,81	-7,36

Tabela 4.6: Teste do sensor de tensão RB4

$V_{fonte}(V)$	0,00	0,87	1,99	2,80	3,86	4,77	5,73	6,70	7,67
$V_{Aplicacao}(V)$	1,65	0,49	-0,49	-1,47	-2,45	-3,43	-4,42	-5,40	-6,38

Tabela 4.7: Teste do sensor de tensão RB5

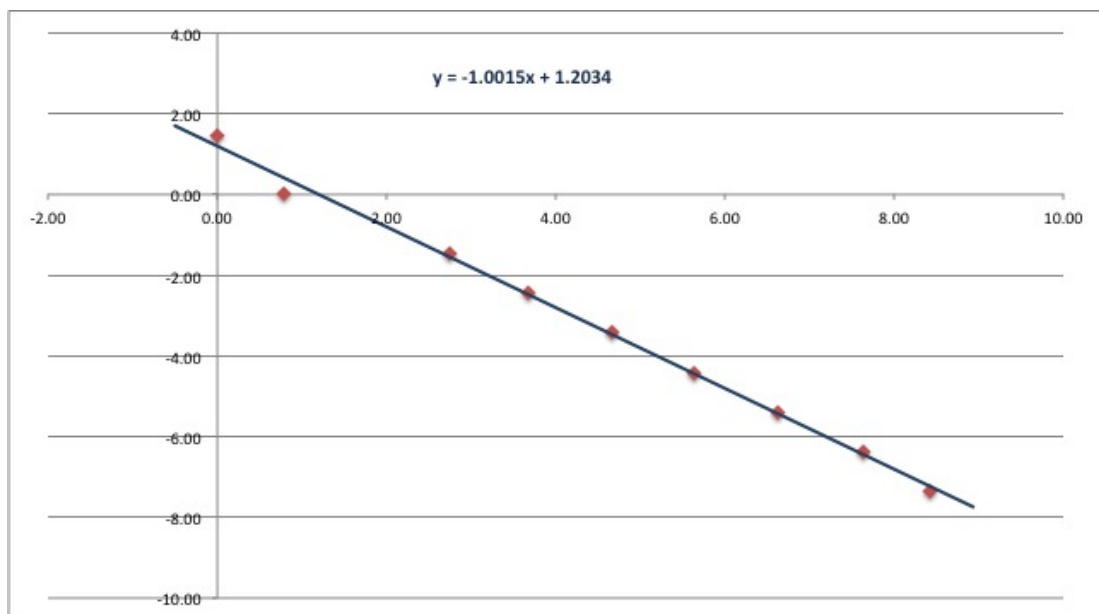


Figura 4.7: Gráfico da tensão obtida em função da medida para o sensor RB3

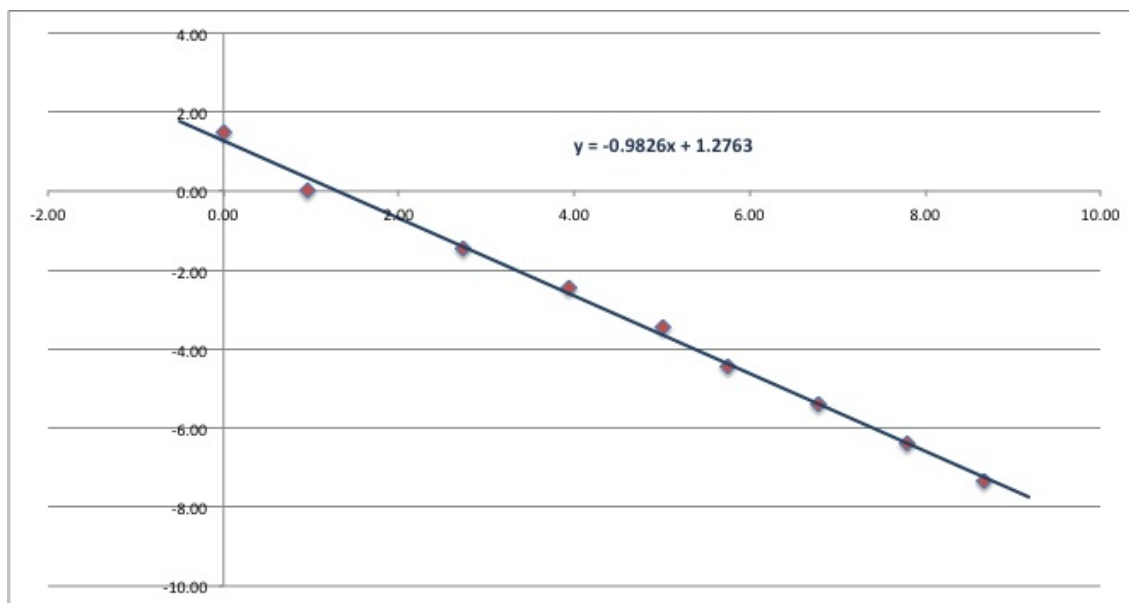


Figura 4.8: Gráfico da tensão obtida em função da medida para o sensor RB4

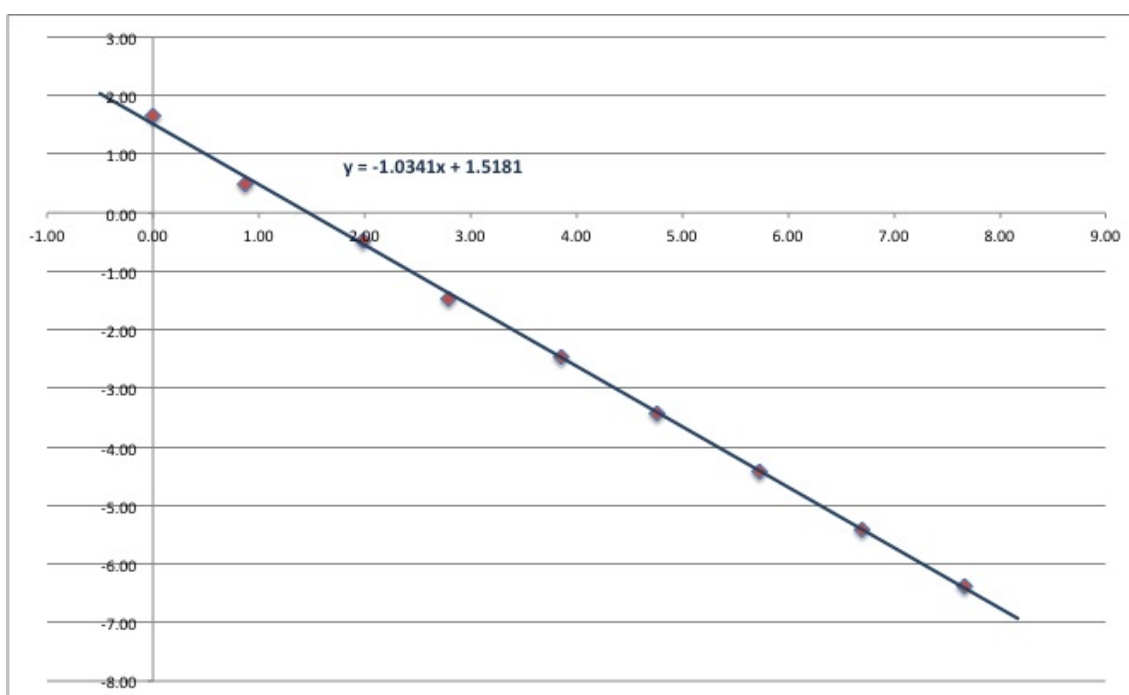


Figura 4.9: Gráfico da tensão obtida em função da medida para o sensor RB5

Conclusão

Seguindo a mesma análise efetuada aos dados obtidos na calibração dos sensores de corrente tem-se que utilizando os valores de m e b das regressões lineares ($Y = mx + b$) como ganho e offset no módulo de calibração é possível garantir a precisão dos valores de tensão obtidos na aplicação. A tabela 4.8 ilustra os valores de ganho e offset para os três sensores de tensão analisados.

Sensor	Ganho	Offset
RB0	-1,002	1,203
RB1	-0,983	1,276
RB1	-1,034	1,518

Tabela 4.8: Valores de calibração para os sensores de tensão

Análise de erros

Tendo em conta a calibração efetuada optou-se por estipular como erro para a tensão e corrente a majoração da diferença entre o valor final obtido na aplicação e a regressão linear utilizada na calibração. Assim sendo as tabelas seguintes representam os erros dos sensores de tensão.

$V_{fonte}(V)$	0,00	0,79	2,74	3,68	4,67	5,64	6,63	7,63	8,43
$ \Delta V (V)$	0,27	0,41	0,06	0,02	0,03	0,01	0,02	0,04	0,14

Tabela 4.9: Erros do sensor de tensão RB3

$V_{fonte} (V)$	0,00	0,95	2,73	3,93	5,02	5,76	6,78	7,80	8,68
$ \Delta V (V)$	0,17	0,33	0,01	0,25	0,38	0,14	0,20	0,26	0,17

Tabela 4.10: Erros do sensor de tensão RB4

$V_{fonte} (V)$	0,00	0,87	1,99	2,80	3,86	4,77	5,73	6, 70	7,67
$ \Delta V (V)$	0,18	0,13	0,03	0,23	0,18	0,28	0,34	0,39	0,43

Tabela 4.11: Erros do sensor de tensão RB5

Observando as tabelas verifica-se que numa perspetiva pessimista o erro dos sensores corresponde ao valor mais elevado de cada tabela. Por conseguinte a tabela 4.12 contém o erro para cada um dos três sensores de tensão.

$ \Delta V_{RB3} (V)$	0,41
$ \Delta V_{RB4} (V)$	0,38
$ \Delta V_{RB5} (V)$	0,43

Tabela 4.12: Erros dos sensor de tensão

Seguindo o mesmo princípio para os sensores de corrente obtêm-se os seguintes valores.

I_{fonte} (A)	0,00	0,20	0,51	0,75	0,90	1,24	1,46	1, 66	1,93
$ \Delta I $ (A)	0,00	0,03	0,02	0,01	0,05	0,04	0,01	0,02	0,01

Tabela 4.13: Erros do sensor de corrente RB0

I_{fonte} (A)	0,00	0,23	0,47	0,74	0,91	1,16	1,37	1, 62	1,86
$ \Delta I $ (A)	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00

Tabela 4.14: Erros do sensor de corrente RB1

I_{fonte} (A)	0,00	0,17	0,39	0,63	0,83	1,15	1,33	1, 57	1,77
$ \Delta I $ (A)	0,05	0,03	0,02	0,01	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01

Tabela 4.15: Erros do sensor de corrente RB2

Efetuada a mesma majoração do erro para os sensores de corrente obtém -se a tabela 4.16.

$ \Delta I_{RB0} $ (A)	0,05
$ \Delta I_{RB1} $ (A)	0,03
$ \Delta I_{RB2} $ (A)	0,05

Tabela 4.16: Erros dos sensor de corrente

Falta apenas neste momento analisar as duas últimas grandezas medidas, o torque e a velocidade. Tendo em conta que estas são obtidas pelo inversor do motor de carga e que a sua documentação não possui informação acerca do erro optou-se por considerar que este consiste em metade da resolução, ou seja,

$$\Delta Torque = \frac{0,1}{2} = 0,05 Nm \quad (4.1)$$

$$\Delta Torque = \frac{1}{2} = 0,5 RPM \quad (4.2)$$

4.3 Resultados finais

Tendo sido concluída a calibração dos sensores de corrente e tensão da bancada de testes é possível finalmente efetuar a análise de um motor elétrico tendo em conta a sua performance. Neste caso foi utilizado o motor monofásico desenvolvido na universidade da figura 4.10. Este encontra-se em malha aberta e conectado ao motor de carga por intermédio de um veio visível na figura.

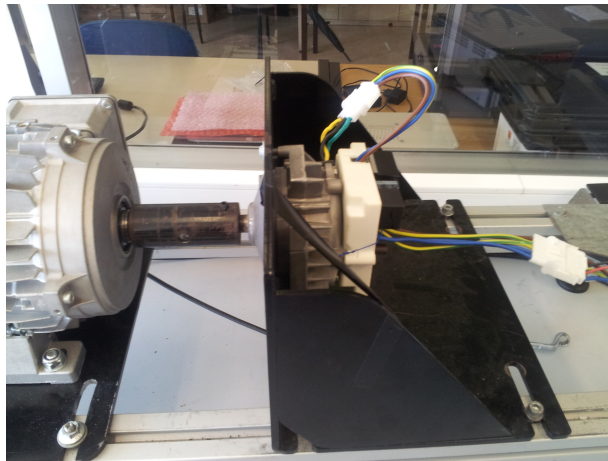


Figura 4.10: Motor em teste

O motor da figura 4.10 encontra-se alimentado por uma bateria de lítio de 36 V, visível na figura 4.11, devidamente carregada.



Figura 4.11: Bateria do motor em teste

Para a realização dos testes de performance sujeitou-se o motor em teste à curva de torque visível na figura 4.12.

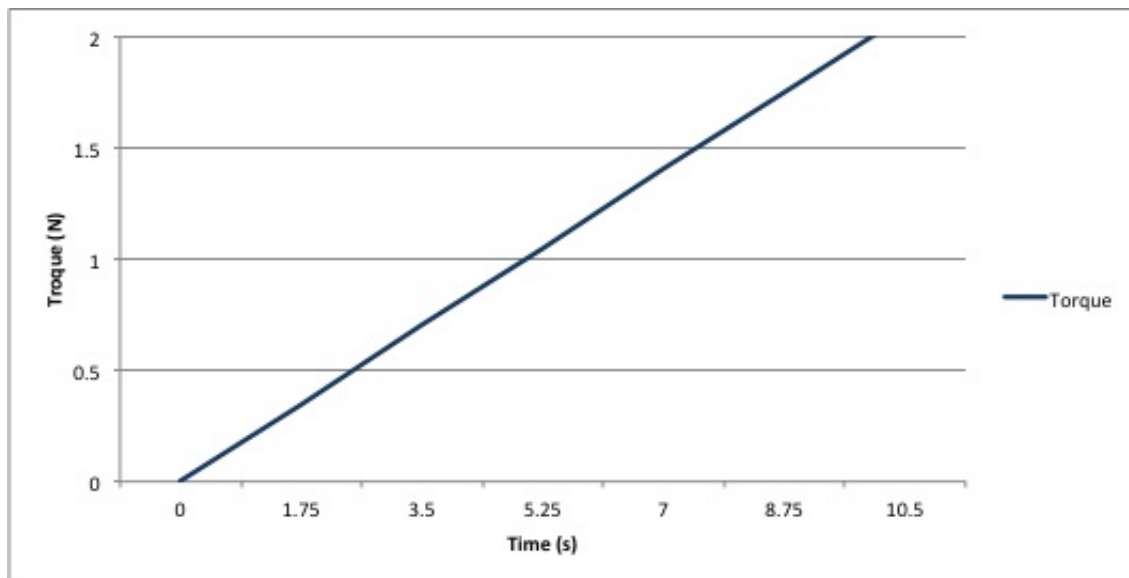


Figura 4.12: Curva de torque imposta ao motor em teste

A figura 4.13 representa o gráfico de performance do motor em teste quando sujeito a uma carga. Analisando a figura verifica-se que, tal como esperado a eficiência, aumenta com o aumento do torque atingindo um valor máximo estável de aproximadamente 85%. A existência de um ponto de eficiência mais elevado é explicada pelo facto de no momento da leitura a velocidade, devido ao seu momento de inércia, diminui a um ritmo mais lento que a potência elétrica de entrada. Como resultado verifica-se um aumento da eficiência. Esta diminuição de potência elétrica e velocidade ocorre quando o motor desliga pois atingiu o seu limite máximo de potência elétrica, aproximadamente 1000 Watt (W), e não consegue contrariar a carga a que está sujeito. Com isto conclui-se que o motor em teste possui um torque máximo de cerca 1,2 Nm.

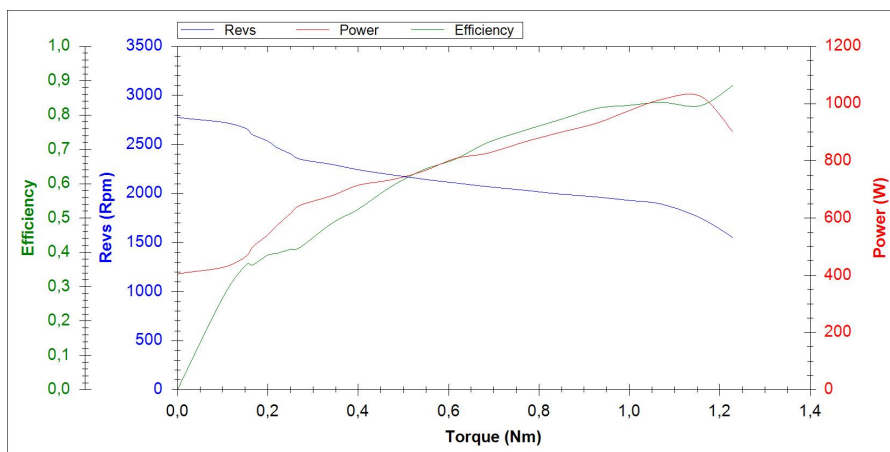


Figura 4.13: Gráfico de performance do motor em teste quando sujeito a uma carga

Analisando agora o gráfico de potência elétrica da figura 4.14 verifica-se que sem carga o motor possui um consumo de 400 W. No entanto quando é sujeito à curva de torque da figura 4.12, que tem início aos 9 segundos, este procura compensar a carga aumentando o consumo de energia até cerca dos 1000 W momento em que por motivos de segurança reduz o seu consumo a 0 W. Este ponto, já abordado na análise da performance do motor, consiste no momento em que a carga é excessiva para o motor obrigando-o a exceder a sua potência elétrica máxima e por conseguinte a efetuar uma paragem abrupta.

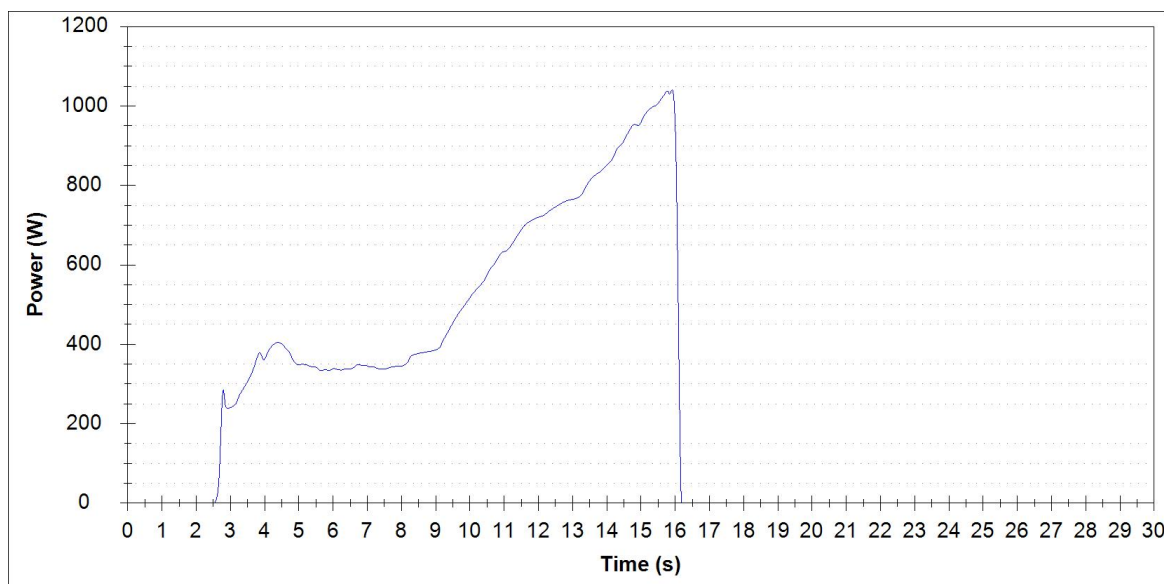


Figura 4.14: Gráfico da potência de entrada no Motor em teste quando sujeito a carga

Esta mesma análise pode ser efetuada para a figura 4.15 onde é possível visualizar o consumo de corrente do motor com e sem carga. Neste caso o consumo sem carga é de aproximadamente 8 A sendo que quando sujeito á curva de torque da figura 4.12 atinge um

valor máximo de cerca de 30 A, momento em que por motivos de segurança o motor desliga.

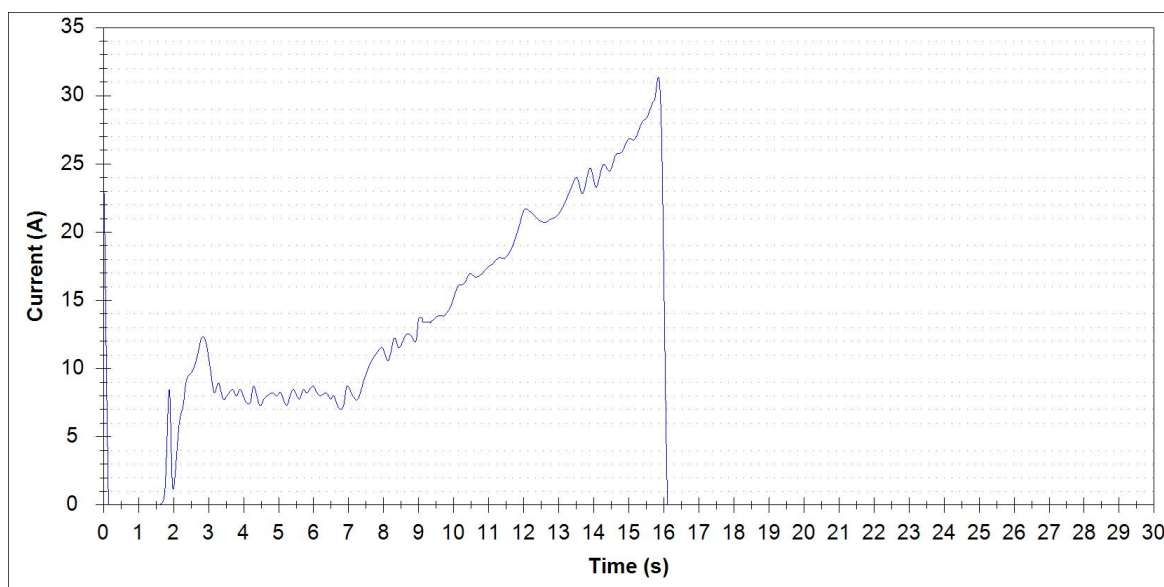


Figura 4.15: Gráfico da corrente de entrada no motor em teste quando sujeito a carga

Capítulo 5

Conclusões

A realização desta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma bancada de testes para motores elétricos capaz de fornecer ao utilizador informação suficiente acerca da sua performance permitindo assim retirar as devidas conclusões. Conclui-se que este objetivo foi alcançado tendo sido efetuado a análise de um motor desenvolvido na universidade cujos resultados foram analisados nesta dissertação.

Relativamente aos restantes objetivos inicialmente propostos para o desenvolvimento da bancada verifica-se que estes foram alcançados sendo que durante projeto foi necessário efetuar pequenos ajustes na escolha dos componentes por forma a reduzir os custos inerentes à sua aquisição. Como principal exemplo tem-se a aquisição de um sensor de torque e velocidade que apesar de estudado e escolhido foi substituído pelos valores fornecidos pelo inversor do motor de teste.

Em conclusão, o trabalho realizado neste projeto constituiu um desafio enriquecedor devido à sua diversidade, isto é, durante a realização do mesmo foi necessária a utilização de conhecimentos de eletrónica, programação de baixo nível (firmware), programação de alto nível (aplicação) e por fim o maior desafio consistiu no estudo do protocolo utilizado na comunicação com o inversor do motor de carga e a sua integração na aplicação desenvolvida.

5.1 Trabalho futuro

Para trabalho futuro é recomendável a realização das diferentes operações em módulos independentes reduzindo assim a interferência e facilitando o seu desenvolvimento e compreensão.

No hardware desenvolvido é recomendável a utilização de circuitos impressos e de uma ADC com um maior número de bits por forma a minimizar a introdução de ruído e reduzir os erros de leitura. Por fim seria importante a utilização de sensores cuja precisão da tensão de offset e ganho seja mais elevada de modo a reduzir o erro.

Ao nível do motor de carga utilizado deveram ser incorporados na aplicação desenvolvida os inúmeros parâmetros configuráveis do inversor permitindo assim a realização de diferentes testes de performance.

Finalmente deveram ser introduzidos sensores de torque e velocidade independentes garantindo assim a precisão dos valores obtidos. Estes foram inicialmente identificados, no entanto devido ao seu elevado custo não foram adquiridos.

Bibliografia

- [1] (2014, Settembre). [Online]. Available: http://1.bp.blogspot.com/_9C_r6ZaB9QM/S-0BgCXNxnI/AAAAAAAAAB4I/4gF9BO58ajo/s1600/motors_image.jpg
- [2] U. d. B. Laboratorio di azionamenti e macchine elettriche. (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://www.die.ing.unibo.it/Labs/lame/img/img27.jpg>
- [3] A. Tilloch and R. Taylor, *The philosophical magazine and journal*, vol. 59, 1822.
- [4] L. NerdKits. (2014, Settembre). [Online]. Available: http://www.nerdkits.com/videos/motors_and_microcontrollers_101/motor_disassemble.jpg
- [5] (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://www.rc-network.de/forum/attachment.php?s=de20980eb55fe69637a77a3a58ef0483&attachmentid=380432&d=1260344179>
- [6] digitalPimple. (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=ZAY5JInyHXY>
- [7] T. Helms. (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://experimentalev.wordpress.com/2011/03/22/motor-brush-replacement-how-to/>
- [8] A. Hughes, *Electric Motors and Drives*. Elsevier Ltd., 2006.
- [9] T. Global. (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://www.tmeic.com>
- [10] D. S. Zurek. (2014, Settembre). [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wirnik_by_Zureks.jpg
- [11] Imajey. [Online]. Available: <http://www.learnengineering.org>
- [12] (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://www.electrical4u.com/synchronous-motor-working-principle/>
- [13] (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://d9nip7cbts6f3.cloudfront.net/files/u65/ScottMotorCharacteristic.gif>
- [14] I. UTEK Advanced Sensor Technology. (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://www.futek.com>
- [15] O. Inc. (2014, Settembre). [Online]. Available: <http://sigma.octopart.com>
- [16] [Online]. Available: http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_10/5.html
- [17] G. N. G. . C. KG, *USS Protocol*, Settembre 2014.

- [18] N. Drivesystems. (2014, Setembro). [Online]. Available: <https://www.nord.com>
- [19] Microchip. (2014, Setembro). [Online]. Available: <http://www.microchip.com>
- [20] Microsoft. (2014, Setembro). [Online]. Available: <http://www.visualstudio.com>

